



**Mónica Andreia
Barquina Alves**

**Mecanismos de Erosão e Deposição de Sedimentos
Coesivos**



**Mónica Andreia
Barquina Alves**

**Mecanismos de Erosão e Deposição de Sedimentos
Coesivos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação da Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Esta tese é dedicada:

Aos meus pais
Ao meu Tiago

o júri

presidente

Prof. Doutor Aníbal Guimarães da Costa
professor catedrático da Universidade de Aveiro

Doutor Luís Ivens Portela
investigador auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof.^a Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes
professora auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

A todos os que me acompanharam durante esta fase da minha vida através da sua disponibilidade, compreensão e amizade, e que de forma directa ou indirecta contribuíram para a realização deste trabalho, desejo expressar aqui o meu profundo reconhecimento e agradecimento.

Ao orientador Carlos Coelho e à co-orientadora Margarida Lopes, quero expressar o meu agradecimento pelos seus ensinamentos, dedicação, partilha de conhecimentos técnico-científicos e, principalmente, amizade que me permitiu a elaboração deste trabalho e a minha formação como engenheira.

À Sandra Costa, bolsreira do projecto MURANO, por todo o apoio, atenção e disponibilidade.

Aos meus pais António Alves e Maria da Ascensão Alves, agradeço de uma forma muito especial, o amor e o carinho que incondicionalmente me dedicam, a compreensão que sempre demonstraram e o permanente incentivo nos momentos mais difíceis, bem como todo o esforço feito para que este trabalho hoje exista.

Aos meus avós maternos, pela coragem e incentivo.

Finalmente, agradeço ao meu Tiago, o incentivo, a compreensão, a dedicação e o amor, que tanto têm contribuído para a minha felicidade, e consequentemente para a concretização desta dissertação.

A todos os mencionados e aqueles que não mencionei a minha mais profunda gratidão.

palavras-chave

Ria de Aveiro, transporte sedimentar, sedimentos coesivos, deposição, erosão.

resumo

A Ria de Aveiro é rica em peixes e aves aquáticas, possui grandes planos de água, locais de eleição para a prática de todos os desportos náuticos. Além destes atractivos, a Ria é também utilizada para a produção de sal, actividade que já teve grande importância na economia aveirense, mas que tem vindo a perder com o decorrer dos anos a sua preponderância, devido, em parte, à erosão de alguns muros das marinhas e ao assoreamento de alguns canais. Assim, dada a sua implicação na região, esta dissertação, aborda os mecanismos de deposição e de erosão dos sedimentos coesivos, contribuindo para o melhor conhecimento da relação entre o escoamento e os sedimentos.

Inicia-se a dissertação com a caracterização geral dos sedimentos coesivos e a descrição dos mecanismos envolvidos no seu transporte. Ao constatar os inúmeros mecanismos envolvidos e interacção entre eles, concluiu-se que o transporte de sedimentos coesivos é um processo complexo. Assim, nos capítulos 3 e 4 apenas se estudam os mecanismos da deposição e da erosão, respectivamente, onde são efectuadas análises de sensibilidade às variáveis intervenientes nas respectivas formulações.

No capítulo 5 faz-se um estudo da deposição e da erosão, aplicado à Ria de Aveiro. Deste estudo chegou-se à conclusão que nos canais junto à antiga lota de Aveiro, ocorre mais facilmente erosão do que deposição de sedimentos.

No final são apresentadas algumas das principais conclusões do trabalho e possíveis vias a seguir no desenvolvimento de futuras investigações.

keywords

Ria de Aveiro, sediment transport, cohesive sediments, deposition, erosion.

abstract

The Ria de Aveiro is rich in fish and waterfowl, has big water surfaces areas, places of election to practice all water sports. It was also used for the production of salt, activity that had great importance in the economy of Aveiro, but has been losing over the years its dominance, due in part to the erosion of the saltpan walls and siltation of some channels. So, giving its involvement in the region, this dissertation, discusses the mechanisms of deposition and erosion of cohesive sediment, contributing to a better understanding of the relationship between the flow and sediments.

The dissertation starts with the general characterization of cohesive sediments and description of the mechanisms involved in its transport. Realizing the many mechanisms involved and interactions between them, it was concluded that the transport of cohesive sediments is a complex process. Thus, in chapters 3 and 4 are presented the studies of deposition and erosion, respectively, which include a sensitivity analysis of the variables involved in their formulations.

In chapter 5, a study of deposition and erosion is applied to the Ria de Aveiro. In this analysis it was concluded that in the channels near the old fish market of Aveiro, erosion occurs more easily than deposition of sediments.

At the end are presented some of the main conclusions of the work and possible developments of future research.

“Quando amamos e acreditamos do fundo de nossa alma, em algo, nos sentimos mais fortes que o mundo, e somos tomados de uma serenidade que vem da certeza de que nada poderá vencer a nossa fé. Esta força estranha faz com que sempre tomemos a decisão certa, na hora exacta e, quando atingimos nossos objectivos ficamos surpresos com nossa capacidade.”

Paulo Coelho

ÍNDICE GERAL

LISTA DE SÍMBOLOS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xi
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Enquadramento	1
1.3 Objectivos	2
1.4 Estrutura.....	3
CAPÍTULO 2	5
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COESIVOS.....	5
2.1 Caracterização geral dos sedimentos coesivos	5
2.2 Mecanismos envolvidos no transporte de sedimentos coesivos	5
2.2.1 Floculação	6
2.2.2 Sedimentação	7
2.2.3 Deposição	8
2.2.4 Consolidação	9
2.2.5 Erosão.....	9
2.2.6 Adsorção e desadsorção	10
CAPÍTULO 3	11
DEPOSIÇÃO	11
3.1 Introdução	11
3.1.1 Concentração de matéria particulada em suspensão, C_s	11

3.1.2	Velocidade de queda, w	12
3.1.2.1	Velocidade de queda para baixas concentrações de sedimentos	12
3.1.2.2	Velocidade de queda para qualquer valor de concentração de sedimentos	15
3.1.3	Probabilidade de deposição, P_d	15
3.1.3.1	Tensão tangencial no fundo	16
3.1.3.2	Tensão tangencial crítica de deposição total	16
3.2	Análise paramétrica	16
3.2.1	Relação entre a velocidade de queda e a constante K	16
3.2.2	Relação entre a velocidade de queda e a constante m	18
3.2.3	Relação entre a velocidade de queda e a concentração de matéria particulada em suspensão	19
3.2.4	Estudo da sensibilidade das variáveis para a determinação do parâmetro de dissipação, G	21
3.2.4.1	Relação entre a velocidade de atrito e a velocidade média do escoamento	21
3.2.4.2	Relação entre a velocidade de atrito e a altura do escoamento	22
3.2.4.3	Relação entre a taxa de dissipação (ϵ) e a distância ao fundo	23
3.2.4.4	Relação entre o parâmetro de dissipação (G) e a distância ao fundo	24
3.2.5	Relação entre a velocidade de queda e a distância ao fundo	25
3.2.6	Relação entre a velocidade de queda e a velocidade média do escoamento	26
3.3	Condições de deposição	28
3.3.1	Taxas de deposição	30
CAPÍTULO 4		35
EROSÃO		35
4.1	Introdução	35
4.2	Taxa de erosão superficial	35
4.2.1	Tensão tangencial crítica de erosão superficial, $\tau_{cr,es}$	36
4.2.2	Constante da taxa de erosão superficial, M_{es}	37
4.3	Tensão tangencial crítica de erosão gravítica, $\tau_{cr,eg}$	37

4.4	Massa volúmica	38
4.5	Análise paramétrica	38
4.5.1	Relação entre a tensão tangencial crítica de erosão superficial e a massa volúmica	38
4.5.2	Relação entre a constante da taxa de erosão superficial e a massa volúmica.....	39
4.5.3	Relação entre a tensão tangencial crítica de erosão gravítica e a massa volúmica	40
4.5.4	Relação entre a taxa de erosão superficial e a velocidade média do escoamento	41
4.5.4.1	Taxa de erosão superficial segundo Ariathurai e Partheniades.....	41
4.5.4.2	Taxa de erosão superficial segundo Parchure e Mehta.....	45
CAPÍTULO 5	47
APLICAÇÃO À RIA DE AVEIRO	47
5.1	Introdução	47
5.2	Deposição.....	48
5.2.1	Taxas de deposição em marés mortas	49
5.2.2	Taxas de deposição em marés vivas.....	49
5.3	Erosão	50
5.3.1	Taxas de erosão superficial em marés mortas	50
5.3.2	Taxas de erosão superficial em marés vivas.....	50
CAPÍTULO 6	53
CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
6.1	Conclusões	53
6.2	Desenvolvimentos futuros	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Constante de Nicholson e O'Connor (equação 4.4)	$(Nm^{5/2}/kg^{3/2})$
A_1	Constante de Nicholson e O'Connor (equação 3.9)	$(m^4/kg/s)$
A_2	Constante de Nicholson e O'Connor (equação 3.9)	(m^3/kg)
B	Constante de Nicholson e O'Connor (equação 4.4)	$(-)$
B_1	Constante	$(-)$
B_2	Constante	$(-)$
C_H	Concentração a partir da qual a velocidade de queda diminui	(g/l)
C_s	Concentração de matéria particulada em suspensão	(g/l)
G	Densidade das partículas (equação 4.11)	$(-)$
G	Parâmetro de dissipação	(s^{-1})
K	Constante empírica	$(-)$
M_{eg}	Constante da taxa de erosão gravítica (equação 4.9)	$(mg/cm^2/hr)$
M_{es}	Constante da taxa de erosão superficial ou erodibilidade	$(g/m^2/s)$
P_d	Probabilidade de deposição	$(-)$
P_i	Peso antes da filtração (equação 3.2)	(mg)
P_f	Peso depois da filtração (equação 3.2)	(mg)
Q_d	Taxa de deposição	$(g/m^2/s)$
Q_{es}	Taxa de erosão superficial	$(g/m^2/s)$
\bar{U}	Velocidade média do escoamento	(m/s)
V_{af}	Volume de água filtrado (equação 3.2)	(l)
a	Constante empírica de Van Leussen (equação 3.5)	$(-)$
a_{eg}	Constante de Hwang e Mehta (equação 4.8)	$(-)$
a_{es}	Constante de Hwang e Mehta (equação 4.3)	$(-)$

b	Constante empírica de Van Leussen (equação 3.5)	(-)
b_{eg}	Constante de Hwang e Mehta (equação 4.8)	(-)
b_{es}	Constante de Hwang e Mehta (equação 4.3)	(-)
c_{es}	Constante de Hwang e Mehta (equação 4.3)	(-)
d_m	Diâmetro mediano do flóculo (equação 3.10)	(cm)
g	Aceleração da gravidade	(m/s ²)
h	Altura do escoamento	(m)
j	Coefficiente de Van Rijn (equação 4.5)	(-)
k	Coefficiente de Van Rijn (equação 4.5)	(-)
k	Constante de Von Karman (equação 3.7)	(-)
m	Constante empírica	(-)
n	Coefficiente de rugosidade de Manning (equação 3.8)	(s/m ^{1/3})
u^*	Velocidade de atrito	(m/s)
w	Velocidade de queda ou de sedimentação	(m/s)
z	Altura desde o fundo	(m)
α	Coefficiente (equação 4.2)	(m/N ^{1/2})
α_0	Constante do diâmetro mediano do flóculo (equação 3.13)	(gm ² /cm ³ s ²)
γ	Peso volúmico dos sedimentos no estado natural	(kN/m ³)
γ_s	Peso volúmico seco	(kN/m ³)
γ_w	Peso volúmico da água	(kN/m ³)
ε	Taxa de dissipação de energia cinética da turbulência	(m ² /s ³)
ν	Viscosidade cinemática do fluido	(m ² /s)
ρ	Massa volúmica	(kg/m ³)
ρ_l	Constante de Hwang e Mehta (equação 4.3)	(g/cm ³)
ρ_m	Massa volúmica molhada	(kg/m ³)

ρ_{rd}	Massa volúmica de uma camada recém depositada	(kg/m ³)
ρ_s	Massa volúmica seca	(kg/m ³)
ρ_w	Massa volúmica da água	(kg/m ³)
τ	Tensão tangencial no fundo	(N/m ²)
$\tau_{cr,es}$	Tensão tangencial crítica de erosão superficial	(N/m ²)
$\tau_{d,total}$	Tensão tangencial crítica de deposição total	(N/m ²)
τ_{rd}	Tensão tangencial crítica de uma camada recém depositada	(N/m ²)

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1: Aspecto das marinhas de sal.	2
---	---

CAPÍTULO 2

Figura 2.1: Ciclo de deposição e ressuspensão de sedimentos coesivos (adaptado de Maggi, 2005).	6
--	---

Figura 2.2: Flóculo (adaptado de Fernandes, 2001).	6
---	---

Figura 2.3: Influência da concentração de sedimentos na velocidade de queda (adaptado de Huang <i>et al.</i> , 2006).	8
--	---

CAPÍTULO 3

Figura 3.1: Variação da velocidade de queda com a constante K	17
--	----

Figura 3.2: Variação da velocidade de queda com a constante m	19
--	----

Figura 3.3: Variação da velocidade de queda com a concentração de matéria particulada em suspensão.	20
--	----

Figura 3.4: Variação da velocidade de atrito com a velocidade média do escoamento.	22
---	----

Figura 3.5: Variação da velocidade de atrito com a altura do escoamento.	23
---	----

Figura 3.6: Variação da taxa de dissipação com a distância ao fundo.	24
---	----

Figura 3.7: Variação do parâmetro de dissipação com a distância ao fundo.	25
--	----

Figura 3.8: Variação da velocidade de queda com a distância ao fundo.	26
--	----

Figura 3.9: Variação da velocidade de queda com a velocidade média do escoamento.	27
--	----

Figura 3.10: Variação da tensão tangencial no fundo com a velocidade média do escoamento.	29
--	----

CAPÍTULO 4

Figura 4.1: Relação entre a tensão tangencial crítica de erosão superficial e a massa volúmica.	39
Figura 4.2: Relação entre a constante da taxa de erosão superficial e a massa volúmica. ...	40
Figura 4.3: Relação entre a tensão tangencial crítica de erosão gravítica e a massa volúmica molhada.	40
Figura 4.4: Relação entre a taxa de erosão superficial e a velocidade média do escoamento ($\tau_{cr,es}$ mínima e M_{es} mínima).	42
Figura 4.5: Relação entre a taxa de erosão superficial e a velocidade média do escoamento ($\tau_{cr,es}$ máxima e M_{es} mínima).	43
Figura 4.6: Relação entre a taxa de erosão superficial e a velocidade média do escoamento ($\tau_{cr,es}$ mínima e M_{es} máxima).	44
Figura 4.7: Relação entre a taxa de erosão superficial e a velocidade média do escoamento ($\tau_{cr,es}$ máxima e M_{es} máxima).	45
Figura 4.8: Relação entre a taxa de erosão superficial e a velocidade média do escoamento, segundo Parchure e Mehta.	46

CAPÍTULO 5

Figura 5.1: Ciclo de maré.	47
Figura 5.2: Pontos de amostragem das campanhas realizadas ao longo do projecto Interreg SAL (adaptado de Coelho <i>et al.</i> , 2008).	48

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1: Ordens de grandeza da superfície específica, do diâmetro e da razão espessura/diâmetro das partículas da caulinite, ilite e montmorilonite (adaptado de Fernandes, 1994).	5
---	---

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1: Valores de n ($\text{s/m}^{1/3}$) para canais artificiais abertos (adaptado de Fialho, 2006).	14
Tabela 3.2: Valores de n ($\text{s/m}^{1/3}$) para rios e ribeiros (adaptado de Fialho, 2006).	14
Tabela 3.3: Pressupostos admitidos no estudo da relação entre a velocidade de queda e a constante K	17
Tabela 3.4: Pressupostos admitidos no estudo da relação entre a velocidade de queda e a constante m	18
Tabela 3.5: Pressupostos admitidos no estudo da relação entre a velocidade de queda e a concentração de matéria particulada em suspensão.	20
Tabela 3.6: Pressupostos admitidos no estudo da relação entre a velocidade de atrito e a velocidade média do escoamento.	21
Tabela 3.7: Pressupostos admitidos no estudo da relação entre a velocidade de atrito e a altura do escoamento.	22
Tabela 3.8: Pressupostos admitidos no estudo da relação entre a taxa de dissipação e a distância ao fundo.	24
Tabela 3.9: Tensões tangenciais no fundo (N/m^2).	27
Tabela 3.10: Análise das curvas resultantes da variação da tensão tangencial no fundo com a velocidade média do escoamento.	30
Tabela 3.11: Probabilidades de deposição (nd - não há deposição).	31

Tabela 3.12: Taxas de deposição ($1 \times 10^{-6} \text{ g/m}^2/\text{s}$) para $C_s=2,36 \text{ mg/l}$ e $w=5,57 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 31

Tabela 3.13: Taxas de deposição ($1 \times 10^{-6} \text{ g/m}^2/\text{s}$) para $C_s=74,96 \text{ mg/l}$ e $w=5,62 \times 10^{-6} \text{ m/s}$. .. 32

Tabela 3.14: Taxas de deposição ($1 \times 10^{-6} \text{ g/m}^2/\text{s}$) para $C_s=2,36 \text{ mg/l}$ e $w=4,72 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 32

Tabela 3.15: Taxas de deposição ($1 \times 10^{-6} \text{ g/m}^2/\text{s}$) para $C_s=74,96 \text{ mg/l}$ e $w=1,50 \times 10^{-4} \text{ m/s}$. .. 32

Tabela 3.16: Taxas de deposição ($1 \times 10^{-6} \text{ g/m}^2/\text{s}$) para $C_s=2,36 \text{ mg/l}$ 33

Tabela 3.17: Taxas de deposição ($1 \times 10^{-6} \text{ g/m}^2/\text{s}$) para $C_s=74,96 \text{ mg/l}$ 33

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1: Pesos volúmicos e massas volúmicas dos sedimentos do talude dos muros marginais aos canais da Ria de Aveiro..... 38

Tabela 4.2: Pressupostos admitidos para a determinação da taxa de erosão superficial segundo Ariathurai e Partheniades..... 41

Tabela 4.3: Velocidades médias v.s. ocorrência de erosão superficial. 43

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1: Valores de h e \bar{U} adoptados para marés mortas e marés vivas..... 48

Tabela 5.2: Velocidades de atrito, tensões tangenciais no fundo e probabilidades de deposição para marés mortas (nd - não há deposição). 49

Tabela 5.3: Velocidades de atrito, tensões tangenciais no fundo e probabilidades de deposição para marés vivas (nd - não há deposição). 49

Tabela 5.4: Taxas de erosão superficial ($\text{kg/m}^2/\text{s}$) para marés mortas. 50

Tabela 5.5: Taxas de erosão superficial ($\text{kg/m}^2/\text{s}$) para marés vivas. 50

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

No presente capítulo aborda-se a motivação, o enquadramento, os objectivos gerais e a estrutura do trabalho.

1.1 Motivação

A prática de exploração do Sal na Laguna de Aveiro é uma actividade muito antiga, sendo o primeiro escrito conhecido acerca do salgado (conjunto das marinhas) de Aveiro anterior à própria fundação da nacionalidade (Branco *et al.*, 2007). Contudo, nas últimas décadas, tem-se assistido ao declínio do número de marinhas activas, em parte, resultado das fortes correntes de enchente que penetram no interior da Laguna, e que vão destruindo os muros de protecção das marinhas (motas) e escavando o fundo dos canais (Coelho *et al.*, 2008).

Os muros de terra ou motas são pequenos diques rudimentares, construídos, pelos marnotos (salineiros de Aveiro), para proteger as marinhas das águas dos canais e controlar, através de comportas nelas instaladas, a hidrodinâmica da Ria. No passado, na sua construção eram usadas como matéria-prima as argilas que constituem os fundos das marinhas e matéria orgânica (Coelho *et al.*, 2008).

Dadas as implicações na região, onde a evolução da Ria de Aveiro está condicionada pela erosão de alguns muros das marinhas e pelo assoreamento de alguns canais, pretende-se com o estudo dos mecanismos de deposição e de erosão dos sedimentos coesivos, contribuir para o melhor conhecimento da relação entre o escoamento e os sedimentos.

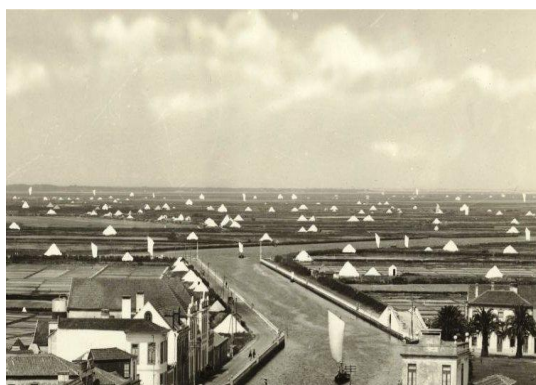
1.2 Enquadramento

Há cerca de 7000 anos, quando o clima passou por uma fase mais quente, muitas vezes qualificada óptimo climático, o mar penetrou por todos os vales então existentes no litoral, entre os quais o Vale do Vouga. Com o arrefecimento progressivo do clima que se seguiu, o mar foi recuando e a areia foi-se acumulando. Amorim Girão estava seguro de que, por altura do século I d.C., embora a forma actual estivesse longe de existir, encontravam-se já

em actividade as causas que contribuíram para a formação da actual Laguna de Aveiro (Rebelo, 2007).

A Laguna de Aveiro define-se, hoje, como sendo bastante alongada e ramificada, com um comprimento de 45km segundo o seu eixo longitudinal e com cerca de 10km de extensão na zona mais larga. Uma barreira extensa de areia separa o mar da Laguna. Esta barreira é de largura variável, dependendo de fenómenos como a erosão, disponibilidade e deposição de sedimentos (Araújo, 2005).

Na Laguna de Aveiro localizam-se as marinhas de sal (Figura 1.1). No século XV existiam cerca de 500 marinhas na Ria de Aveiro. Há cerca de 50 anos, cerca de 270 marinhas produziam sal e no ano de 2006, eram apenas 8 as marinhas em exploração. As ainda existentes ocupam as áreas de sapal, que constituem ilhas dentro da Ria, sendo muito poucas as que têm acesso por terra (Coelho *et al.*, 2008).



a) 1950 (Rocha, 2008);



b) 2004-2007 (IMA, 2008);

Figura 1.1: Aspecto das marinhas de sal.

1.3 Objectivos

O presente trabalho pretende apresentar contributos:

- Sobre o estado da arte do transporte de sedimentos coesivos, principalmente os mecanismos de deposição e de erosão;
- Na quantificação de taxas de deposição e de erosão, efectuando análise de sensibilidade às variáveis intervenientes nas formulações numéricas dos respectivos mecanismos;
- Na aplicação dessas formulações a situações tão próximas quanto possível da realidade e em particular à Ria de Aveiro.

1.4 Estrutura

Após a apresentação da motivação, do enquadramento e dos objectivos do trabalho, refere-se agora a sequência dos trabalhos desenvolvidos e de que forma estes se apresentam nos capítulos seguintes.

Inicia-se o trabalho com a caracterização geral dos sedimentos coesivos e a descrição dos mecanismos envolvidos no seu transporte, nomeadamente, a floculação, a sedimentação, a deposição, a consolidação, a erosão, e a adsorção e desadsorção.

Ao constatar os inúmeros mecanismos envolvidos e a interacção entre eles, concluiu-se que o transporte de sedimentos coesivos é um processo complexo. Assim, no capítulo 3 são apresentadas formulações para a determinação da deposição. Esta é determinada a partir da taxa de deposição, que depende de várias variáveis, às quais é realizada uma análise de sensibilidade.

No capítulo 4 analisa-se a erosão através da quantificação de taxas de erosão superficial, com análise de sensibilidade às variáveis intervenientes nas respectivas formulações.

No capítulo 5 aplicam-se as formulações apresentadas nos capítulos anteriores ao caso da Ria de Aveiro, e mais especificamente aos canais junto à antiga lota, para estimar taxas de deposição e de erosão superficial, tentando representar o comportamento numa situação concreta.

O capítulo 6 apresenta em síntese as principais considerações que se foram destacando no desenrolar deste trabalho. São indicados possíveis desenvolvimentos futuros que representam a continuidade desta investigação.

CAPÍTULO 2

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COESIVOS

Na secção 2.1 caracterizam-se, em geral, os sedimentos coesivos. Na secção 2.2 descrevem-se os mecanismos envolvidos no seu transporte.

2.1 Caracterização geral dos sedimentos coesivos

Os sedimentos coesivos, em estuários e lagunas, são constituídos por fracções de minerais inorgânicos, materiais orgânicos e bioquímicos (Fernandes, 2001).

Os minerais podem ser do tipo argiloso e do tipo não argiloso (quartzo e carbonatos). Os minerais do tipo argiloso são os que existem em maior percentagem nos sedimentos coesivos, sendo a caulinite, a ilite e a montmorilonite os principais grupos de minerais argilosos presentes (Fernandes, 2001). Na Tabela 2.1 indicam-se para estes três grupos as ordens de grandeza da superfície específica (considerando a soma da área da superfície externa e da área da superfície interna (caso ela exista) das partículas constituintes, por unidade de massa (Benta, 2007)), do diâmetro e da razão espessura/diâmetro das respectivas partículas (Fernandes, 1994). Os materiais orgânicos incluem detritos animais e vegetais e bactérias.

Tabela 2.1: Ordens de grandeza da superfície específica, do diâmetro e da razão espessura/diâmetro das partículas da caulinite, ilite e montmorilonite (adaptado de Fernandes, 1994).

Mineral de Argila	Superfície Específica (m ² /g)	Diâmetro (µm)	Espessura/Diâmetro
Caulinite	10-20	0,3-3,0	1/3-1/10
Ilite	80-100	0,1-2,0	1/10
Montmorilonite	800	0,1-1,0	1/100

Em termos granulométricos, apesar de algo indefinida a fronteira, consideram-se sedimentos com propriedades coesivas, aqueles cujos diâmetros característicos são inferiores a 63µm (Araújo, 2004; Fernandes, 2001).

2.2 Mecanismos envolvidos no transporte de sedimentos coesivos

O transporte de sedimentos coesivos envolve diversos mecanismos, como se descrevem em seguida, ilustrando-se alguns desses mecanismos na Figura 2.1.

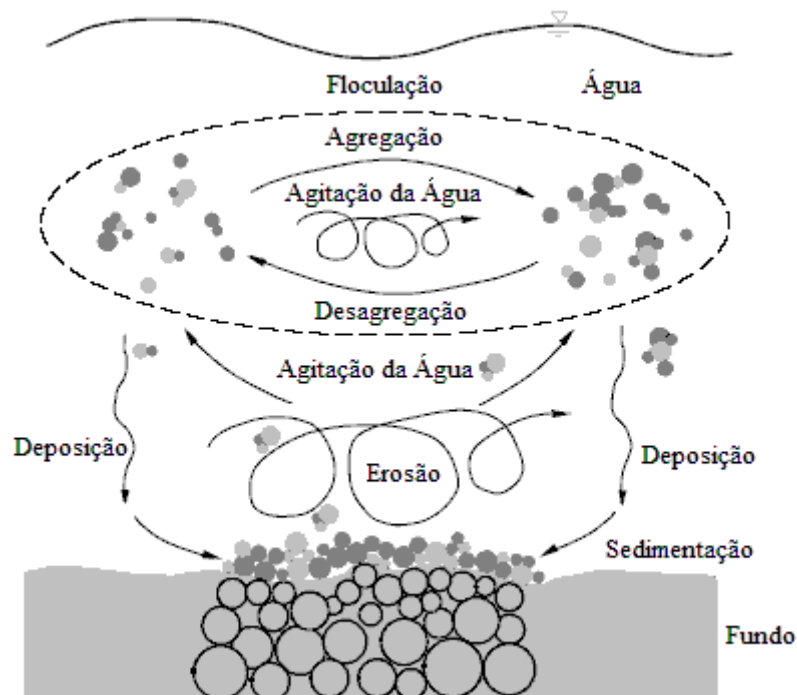


Figura 2.1: Ciclo de deposição e ressuspensão de sedimentos coesivos (adaptado de Maggi, 2005).

2.2.1 Floculação

As partículas suspensas dos sedimentos coesivos tendem a agregar-se formando flóculos (Figura 2.2). Este processo é fundamental para a sedimentação, pois flóculos maiores, além de aumentarem a sedimentação, aumentam a probabilidade desta ocorrer (Fernandes, 2001), sendo dependente da colisão entre as partículas (Cancino e Neves, 1999) e da eficiência da colisão. A colisão das partículas depende, essencialmente, da concentração de matéria particulada em suspensão, das condições de turbulência, da aproximação entre elas por movimentos Brownianos (as partículas aproximam-se de uma forma aleatória, não se podendo descrever matematicamente a sua posição em função do tempo (Costa, 2007)), e devido a terem velocidades de queda ou de sedimentação diferenciadas (Trento, 2005). A eficiência da colisão depende das características das partículas (por exemplo: teor orgânico e origem biológica) e das condições do meio envolvente, onde a salinidade toma um papel relevante (Fernandes, 2001).



Figura 2.2: Flóculo (adaptado de Fernandes, 2001).

A maior parte das partículas dos sedimentos coesivos apresentam cargas eléctricas negativas na superfície. Devido a essas cargas os sedimentos coesivos atraem iões positivos de sais dissolvidos na água, bem como, moléculas de água, criando-se uma dupla camada eléctrica. Assim, quando duas partículas se aproximam, a repulsão electrostática evita o seu choque.

Até há poucos anos existia na comunidade científica um consenso bastante generalizado de que os sedimentos coesivos transportados pela água doce dos rios tendiam a flocular pela salinidade (Trento, 2005). Fernandes (2001) menciona que a salinidade da água provoca a diminuição da espessura da dupla camada eléctrica, devido ao menor gradiente entre a concentração de iões positivos em torno da partícula e a concentração de iões na água, o que leva a que as partículas se aproximem o suficiente, passando as forças de Van der Waals (forças inter-partículas) a ser mais fortes que a repulsão electrostática, ocorrendo a floculação. Contudo, alguns investigadores têm posto em dúvida o seu papel enquanto agente principal da aceleração do mecanismo da floculação. Mikes *et al.* demonstraram em experiências efectuadas com sedimentos do rio Sena que a salinidade actuava sobre a floculação a partir de um valor limite e que logo era controlada por outros factores (de acordo com Trento, 2005).

2.2.2 Sedimentação

A velocidade de queda ou de sedimentação de uma partícula no seio de um fluido depende das forças gravitacionais, que por sua vez dependem da densidade de cada partícula individual ou do volume de água intersticial existente nos flóculos formados por estas, e do atrito provocado pelo movimento de deposição, que depende da forma do flóculo e do número de Reynolds do escoamento, em torno do flóculo durante a deposição (Cancino e Neves, 1999).

Thorn (de acordo com Huang *et al.*, 2006), mostrou que a velocidade de queda aumenta com a concentração de sedimentos, para baixas concentrações, em seguida, atinge um valor máximo e, posteriormente, diminui, para elevadas concentrações, pois a proximidade entre os flóculos faz com que o fluido existente entre eles seja forçado a ascender (Fernandes, 2001). Van Rijn (de acordo com Huang *et al.*, 2006) resumiu numa figura a influência da concentração de sedimentos na velocidade de queda, para sedimentos característicos de diversas regiões de todo o mundo (Figura 2.3).

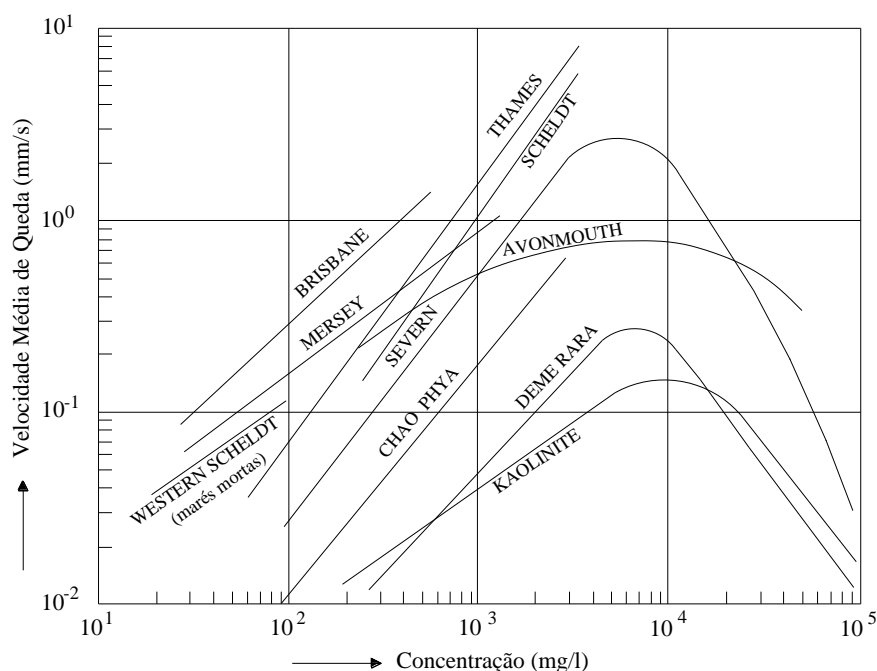


Figura 2.3: Influência da concentração de sedimentos na velocidade de queda (adaptado de Huang *et al.*, 2006).

2.2.3 Deposição

Mehta e Partheniades (de acordo com Huang *et al.*, 2006) efectuaram estudos em laboratório sobre o comportamento dos sedimentos coesivos na deposição e descobriram que esta é controlada pela tensão tangencial no fundo, por processos de turbulência em zonas perto do fundo, pela velocidade de queda, pelo tipo de sedimento, pela profundidade do escoamento, pela concentração de matéria particulada em suspensão e pela constituição iónica do fluido da suspensão (também resumidas em Hayter *et al.*, 1999).

Huang *et al.* (2006) referem que a deposição acontece quando a tensão tangencial no fundo é inferior a uma determinada tensão tangencial crítica de deposição (também referido em Fernandes, 2001). Desta forma, somente os flóculos com suficiente resistência ao corte é que suportam as tensões tangenciais no fundo, e se depositam.

A deposição de sedimentos coesivos pode ser de dois tipos: total e parcial. Quando a tensão tangencial no fundo (τ) é inferior à tensão tangencial crítica de deposição total ($\tau_{d,total}$), todas as partículas de sedimentos e flóculos são depositadas. A deposição parcial ocorre quando a tensão tangencial no fundo é superior à tensão tangencial crítica de deposição total, mas inferior à tensão tangencial crítica de deposição parcial. Neste intervalo de valores da tensão tangencial no fundo, os flóculos com ligações fortes são

depositados e flóculos com ligações fracas permanecem em suspensão. Contudo, o conhecimento actual dos valores da tensão tangencial crítica de deposição total e parcial não são bem compreendidos (Huang *et al.*, 2006).

2.2.4 Consolidação

Segundo Huang *et al.* (2006), a consolidação é outro importante processo do transporte de sedimentos coesivos, sendo, normalmente, considerados dois tipos de consolidação: primária e secundária. A consolidação primária é causada pelo peso próprio do sedimento, bem como, pela deposição de materiais adicionais. Esta começa quando o peso próprio do sedimento supera o excesso de pressão neutra existente nos poros do sedimento. Durante esta fase, o peso próprio das partículas expulsa a água dos poros, e obriga as partículas a manterem-se unidas. A consolidação primária termina quando a pressão neutra é completamente dissipada. A consolidação secundária é causada pela deformação plástica do fundo sob a acção de uma sobrecarga constante. Ela começa durante a consolidação primária e pode durar semanas ou meses.

2.2.5 Erosão

De acordo com Johansen *et al.* (1997), a erosão ocorre quando a tensão tangencial no fundo é superior à tensão tangencial crítica.

Mehta (de acordo com Araújo, 2004) referiu que a erosão varia com a magnitude da tensão tangencial no fundo, apresentando vários modos de erosão dos sedimentos coesivos, nomeadamente, erosão superficial de flóculos do fundo (ocorre flóculo por flóculo devido a quebras inter-partículas e ligações electromecânicas), erosão gravítica (ocorre uma falha geotécnica no fundo, fazendo com que os materiais acima dele fiquem suspensos no escoamento) e arrastamento de lama fluida (os sedimentos do fundo são fluidos, o que destabiliza a interface sedimento-água e, em seguida, a lama fluida é arrastada do fundo) (também resumidas em Johansen *et al.*, 1997). Segundo Araújo (2004), Mehta também referiu que a erosão gravítica ocorre quando a sua tensão tangencial é consideravelmente superior à da erosão superficial e a camada de sedimentos pode tornar-se fluida como resultado da acção das ondas sobre a sua superfície. As ondas podem ser geradas por ventos locais ou podem resultar de tempestades distantes.

Araújo (2004) refere que a erosão de um sedimento é caracterizada por dois parâmetros: pela erosão crítica, que corresponde à velocidade do escoamento a partir da qual começa a erosão, e pela taxa de erosão, que representa a quantidade de sedimentos que a erosão reduz num determinado tempo. Os factores que influenciam a erosão crítica e a taxa de erosão são muito complexos e dependem de características físicas, biológicas e químicas dos componentes dos sedimentos e da água sobrejacente. Os principais factores que afectam a erosão dos sedimentos coesivos foram apresentados por Young e Southard, Mehta, Nichols e Amos *et al.* Estes são o efeito da estrutura do fundo, da salinidade, da temperatura da água, da precipitação, da actividade biológica, do pH, da história de deposição, da composição sedimentar, do teor de água nos sedimentos, da força erosiva do fluido (tensão tangencial do fundo, ondas e correntes) e da concentração de matéria particulada em suspensão.

2.2.6 Adsorção e desadsorção

O transporte de sedimentos coesivos está fortemente relacionado com a qualidade da água, pois muitos poluentes, tais como: metais pesados, pesticidas e nutrientes, adsorvem aos sedimentos coesivos, actuando, assim, como agentes de transporte. Os poluentes podem ser adsorvidos pelas superfícies dos sedimentos ou ser dissolvidos na água (fase adsorvida e dissolvida, respectivamente). A adsorção é definida como a aderência dos poluentes aos sedimentos suspensos provenientes da fase dissolvida. Os poluentes adsorvidos podem ser retirados da coluna de água depois dos sedimentos coesivos se depositarem no fundo. A desadsorção é definida como a dissolução dos poluentes na água, depois de serem removidos da superfície dos sedimentos. Isso, normalmente, acontece quando os sedimentos contaminados são erodidos do fundo (Huang *et al.*, 2006). Experiências realizadas por Thomann e DiToro (1983) mostram que o equilíbrio entre a fase dissolvida e a adsorvida é atingido em minutos.

CAPÍTULO 3

DEPOSIÇÃO

Como o transporte de sedimentos coesivos envolve diferentes mecanismos e a sua interacção é um processo complexo, neste capítulo, apenas se apresenta uma análise ao mecanismo da deposição.

3.1 Introdução

Como verificado no capítulo anterior, são diversos os mecanismos envolvidos no transporte de sedimentos coesivos e a sua interacção é por isso complexa. Daí, neste capítulo apenas se apresentarem alguns estudos do mecanismo da deposição, mais especificamente o da deposição total.

Na quantificação da deposição total foram determinadas taxas de deposição. Estas, foram determinadas de acordo com a fórmula de Krone (equação 3.1), onde é necessário estimar valores de concentração de matéria particulada em suspensão (C_s), velocidades de queda (w) e probabilidades de deposição (P_d) (Huang *et al.*, 2006; Teisson, 1997; Trento *et al.*, 2005).

$$Q_d = C_s w P_d, \quad \tau \leq \tau_{d, \text{total}} \quad (3.1)$$

Em seguida, apresentam-se formulações, bem como, valores a adoptar, para as variáveis que entram na determinação da deposição total.

3.1.1 Concentração de matéria particulada em suspensão, C_s

Os valores de concentração de matéria particulada em suspensão não foram estimados com base em formulações, mas com apoio em valores determinados laboratorialmente por Abrantes (2005).

Abrantes (2005), através de campanhas na Ria de Aveiro, recolheu sedimentos em suspensão ao longo de oito ciclos de maré de Verão (11, 13, 20 e 21 de Setembro de 2001) e de Inverno (13, 15, 20 e 21 de Fevereiro de 2002), em regimes de marés vivas e marés mortas. A amostragem foi efectuada junto à embocadura da Laguna (Barra) e nos canais de

S. Jacinto (Bico do Pargal e Muranzel), de Mira (Forte da Barra), de Ílhavo (Ponte da Friopesca) e do Espinheiro (Rebocho e Parrachil). A selecção dos locais de amostragem teve como condicionantes os recursos logísticos e a navegabilidade dos canais. As amostras, sempre que a profundidade o permitiu, foram colhidas à superfície, a meia-água e a 1m do fundo, com garrafa de Van Dorn (capacidade de 4,5l).

No trabalho de Abrantes (2005), a água colhida na Ria de Aveiro foi filtrada em laboratório, com um intervalo máximo de 48 horas após a colheita. A filtração efectuou-se numa rampa de filtração a vácuo, utilizando filtros HA da Millipore, com porosidade 0,45µm e diâmetro 47mm, previamente pesados. O volume de água filtrada, para determinação de concentrações de matéria particulada em suspensão, variou de 1 a 4l, consoante a carga sólida em suspensão no nível amostrado. Os filtros foram secos em estufa à temperatura de 40°C, durante 24h. Após arrefecimento num excicador, procedeu-se à pesagem para determinar a concentração de matéria particulada em suspensão (mg/l), a partir do peso do material retido no filtro e do volume conhecido de água filtrada (V_{af}), de acordo com a equação 3.2.

$$C_s = \frac{P_f - P_i}{V_{af}} \quad (3.2)$$

Para o estudo da deposição total, que se efectuou neste trabalho e se apresenta de seguida, de entre os inúmeros valores de concentração de matéria particulada em suspensão obtidos por Abrantes (2005), apenas se seleccionaram o menor e o maior valor, correspondentes a 2,36mg/l e 74,96mg/l, respectivamente.

3.1.2 Velocidade de queda, w

A velocidade de queda ao ter um comportamento distinto em função da concentração de matéria particulada em suspensão, como se verificou na secção 2.2.2, pode ser estimada à custa de diferentes formulações. Assim, há formulações que estimam a velocidade de queda em situações de baixas concentrações (secção 3.1.2.1) e outras formulações que serão adequadas para qualquer valor de concentração de sedimentos (secção 3.1.2.2).

3.1.2.1 Velocidade de queda para baixas concentrações de sedimentos

Para Trento (2005), as equações que irão ser demonstradas neste ponto são válidas para concentrações de sedimentos compreendidas entre 0,1g/l e 10g/l, enquanto, para

Huang *et al.* (2006), estas equações não são válidas para elevadas concentrações de sedimentos, não referindo qualquer intervalo de valores.

Krone (de acordo com Huang *et al.*, 2006) propôs a seguinte fórmula para a velocidade de queda:

$$w = KC_s^{4/3} \quad (3.3)$$

em que K é aproximadamente igual a 0,001, dependendo do tipo de sedimento.

Uma relação semelhante foi utilizada por Cole e Miles (de acordo com Huang *et al.*, 2006), por Van Rijn e por Van Leussen (segundo Trento, 2005):

$$w = KC_s^m \quad (3.4)$$

onde K e m variam consideravelmente de estuário em estuário. Para Cole e Miles, K toma valores entre 0,001 e 0,002 e m é 1,00. Para Van Rijn m varia entre 1,00 e 2,00, enquanto, para Van Leussen, m varia no intervalo 0,50 a 3,50.

As expressões acima referidas pressupõem que a velocidade de queda cresce indefinidamente com a concentração de matéria particulada em suspensão, e portanto não contempla nenhuma limitação da mesma por desagregação de flóculos (Trento, 2005).

Em 1994, Van Leussen (de acordo com Huang *et al.*, 2006; Teisson, 1997; Trento, 2005) propôs uma relação empírica para a velocidade de queda, que incluía um parâmetro de dissipação (G), dada por:

$$w = KC_s^m \frac{1 + aG}{1 + bG^2} \quad (3.5)$$

em que K , m , a e b são determinadas por via experimental ou numérica. O parâmetro de dissipação é definido, por Huang *et al.* (2006) e Trento (2005), como se apresenta na equação 3.6. Este pressuposto considera o efeito do incremento da turbulência sobre a agregação e desagregação.

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}} \quad (3.6)$$

Em 2002, Spearman e Roberts (segundo Trento, 2005) utilizaram este pressuposto para simular a sedimentação no estuário do rio Tamar, em Inglaterra, obtendo por iteração um $a=0,12$ e um $b=0,02$. Para estes valores e com $K=0,715$ e $m=0,202$ prevê-se um

crescimento da velocidade de queda até um valor de G de $2,55s^{-1}$. Após atingir este valor, a velocidade de queda diminui.

Conforme Huang *et al.* (2006) e Trento (2005), a taxa de dissipação de energia cinética da turbulência (ε) pode ser calculada através de uma relação empírica predita, em 1993, por Nezu e Nakagawa, em escoamento uniforme com superfície livre, dada por:

$$\varepsilon \cong \frac{u_*^3}{kh} \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad (3.7)$$

onde $k=0,41$.

A velocidade de atrito (u_*) é determinada com base na expressão de Nezu e Rodi (de acordo com Trento, 2005), dependendo da velocidade média e da altura do escoamento, e da resistência ao escoamento traduzida pela rugosidade n (equação 3.8). Na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2 apresentam-se valores para n .

$$u_* = \bar{U} \frac{ng^{1/2}}{h^{1/6}} \quad (3.8)$$

Tabela 3.1: Valores de n ($s/m^{1/3}$) para canais artificiais abertos (adaptado de Fialho, 2006).

Natureza das Paredes	Condições			
	Muito Boas	Boas	Regulares	Más
Canais de terra, retilíneos e uniformes	0,0170	0,0200	0,0225	0,0250
Canais abertos em rocha, uniformes	0,0250	0,0300	0,0330	0,0350
Idem, irregulares; ou de paredes de pedras	0,0350	0,0400	0,0450	-
Canais dragados	0,0250	0,0275	0,0300	0,0330
Canais curvilíneos e lamosos	0,0225	0,0250	0,0275	0,0300
Canais com leito pedregoso e vegetação nos taludes	0,0250	0,0300	0,0350	0,0400
Canais com fundo de terra e taludes empedrados	0,0280	0,0300	0,0330	0,0350

Tabela 3.2: Valores de n ($s/m^{1/3}$) para rios e ribeiros (adaptado de Fialho, 2006).

Rios e Ribeiros	Condições			
	Muito Boas	Boas	Regulares	Más
(a) Limpos, retilíneos e uniformes	0,0250	0,0275	0,0300	0,0330
(b) Idem a (a), porém com vegetação e pedras	0,0300	0,0330	0,0350	0,0400
(c) Com meandros, bancos e poços pouco profundos, limpos	0,0350	0,0400	0,0450	0,0500
(d) Idem a (c), águas baixas, declividades fracas	0,0400	0,0450	0,0500	0,0550
(e) Idem a (c), com vegetação e pedras	0,0330	0,0350	0,0400	0,0450
(f) Idem a (d), com pedras	0,0450	0,0500	0,0550	0,0600
(g) Com margens espaiadas, pouca vegetação	0,0500	0,0600	0,0700	0,0800
(h) Com margens espaiadas, muita vegetação	0,0750	0,1000	0,1250	0,1500

3.1.2.2 Velocidade de queda para qualquer valor de concentração de sedimentos

Como a velocidade de queda varia com a concentração de matéria particulada em suspensão, como referido na secção 2.2.2, Nicholson e O'Connor (de acordo com Huang *et al.*, 2006) propuseram as seguintes relações:

$$\begin{aligned} w &= A_1 C_s^{B_1}, & C_s &\leq C_H \\ w &= A_1 C_H^{B_1} [1,0 - A_2 (C_s - C_H)]^{B_2}, & C_s &> C_H \end{aligned} \quad (3.9)$$

onde $A_1=6,0 \times 10^{-4} \text{ m}^4/\text{kg/s}$, $C_H=25 \text{ g/l}$, $A_2=1,0 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{kg}$, $B_1=1,0$ e $B_2=5,0$. Estas constantes foram determinadas experimentalmente, e dependem do tipo de sedimento e da salinidade.

Conforme Huang *et al.* (2006), Burban *et al.* relacionaram a velocidade de queda com o diâmetro mediano do flóculo a partir de dados de laboratório:

$$w = a d_m^b \quad (3.10)$$

com,

$$a = B_1 (C_s \tau)^{-0,85} \quad (3.11)$$

$$b = -[0,8 + 0,5 \log(C_s \tau - B_2)] \quad (3.12)$$

em que $B_1=9,6 \times 10^{-4}$ e $B_2=7,5 \times 10^{-6}$ (ambas determinadas experimentalmente). Nas equações 3.11 e 3.12, C_s vem expressa em g/cm^3 e τ em dyne/cm^2 .

Lick e Lick e Gailani *et al.* (segundo Huang *et al.*, 2006) forneceram uma equação, obtida experimentalmente, para determinar o diâmetro mediano do flóculo:

$$d_m = \sqrt{\frac{\alpha_0}{C_s \tau}} \quad (3.13)$$

em que α_0 é determinada experimentalmente e toma o valor $10^{-8} \text{ gm}^2/\text{cm}^3 \text{ s}^2$ em água doce.

3.1.3 Probabilidade de deposição, P_d

A probabilidade de deposição representa a probabilidade das partículas aderirem ao fundo e não voltarem a ser arrastadas pelo escoamento, conforme referido em Huang *et al.* (2006), Teisson (1997), Trento *et al.* (2005), sendo determinada da seguinte forma:

$$P_d = 1 - \frac{\tau}{\tau_{d,total}}, \quad \tau \leq \tau_{d,total} \quad (3.14)$$

3.1.3.1 Tensão tangencial no fundo

A tensão tangencial pode ser expressa segundo a clássica distribuição na vertical (Trento, 2005):

$$\tau = \rho_w u_*^2 \left(1 - \frac{z}{h} \right) \quad (3.15)$$

Na determinação da tensão tangencial no fundo, z é nulo, pelo que a equação 3.15 toma a seguinte forma, dependendo da massa volúmica da água (ρ_w) e da velocidade de atrito (u_*):

$$\tau = \rho_w u_*^2 \left(1 - \frac{0}{h} \right) = \rho_w u_*^2 (1 - 0) = \rho_w u_*^2 \quad (3.16)$$

3.1.3.2 Tensão tangencial crítica de deposição total

Inúmeras experiências foram realizadas para determinar os valores da tensão tangencial crítica de deposição total em sedimentos coesivos. Krone (de acordo com Huang *et al.*, 2006) nas experiências que efectuou nos sedimentos da baía de San Francisco (Estados Unidos da América), encontrou um valor de $\tau_{d,total}=0,060\text{N/m}^2$ para valores de concentração inferiores a 0,3g/l, e um valor de $\tau_{d,total}=0,078\text{N/m}^2$ para valores de concentração entre 0,3 e 10g/l. Mehta e Partheniades (de acordo com Huang *et al.*, 2006) descobriram que $\tau_{d,total}$ tomava o valor de $0,15\text{N/m}^2$, para a caulinite em água destilada. Segundo Huang *et al.* (2006), os valores de tensão tangencial crítica de deposição total variam entre 0,06 e $1,10\text{N/m}^2$, dependendo do tipo de sedimento e da respectiva concentração.

3.2 Análise paramétrica

De forma a compreender o comportamento das diferentes variáveis mencionadas anteriormente, fizeram-se e apresentam-se de seguida, análises de relação entre variáveis.

3.2.1 Relação entre a velocidade de queda e a constante K

Para estudar a relação entre a velocidade de queda e a constante K , recorreu-se à equação 3.4 da velocidade de queda para baixas concentrações de sedimentos e fez-se variar a constante K entre 0,001 e 0,002, valores sugeridos por Cole e Miles. Este estudo

foi efectuado para os valores seleccionados dos resultados obtidos por Abrantes (2005), nomeadamente, $C_s=2,36\text{mg/l}$ e $C_s=74,96\text{mg/l}$, e foram utilizados para m o valor proposto por Cole e Miles e os valores extremos sugeridos por Van Rijn e Van Leussen. Como Cole e Miles e Van Rijn sugerem um mesmo valor de m , ou seja, $m=1,00$, a variação da velocidade de queda em função de K é igual para ambos, sendo apenas uma delas analisada (Tabela 3.3). Deste estudo resultou o que se apresenta na Figura 3.1.

Tabela 3.3: Pressupostos admitidos no estudo da relação entre a velocidade de queda e a constante K .

Variável	Análise			
	a) Van Leussen	b) Cole e Miles e Van Rijn	c) Van Rijn	d) Van Leussen
K		0,001-0,002		
C_s (g/l)		$2,36 \times 10^{-3}$ e $74,96 \times 10^{-3}$		
m	0,50	1,00	2,00	3,50

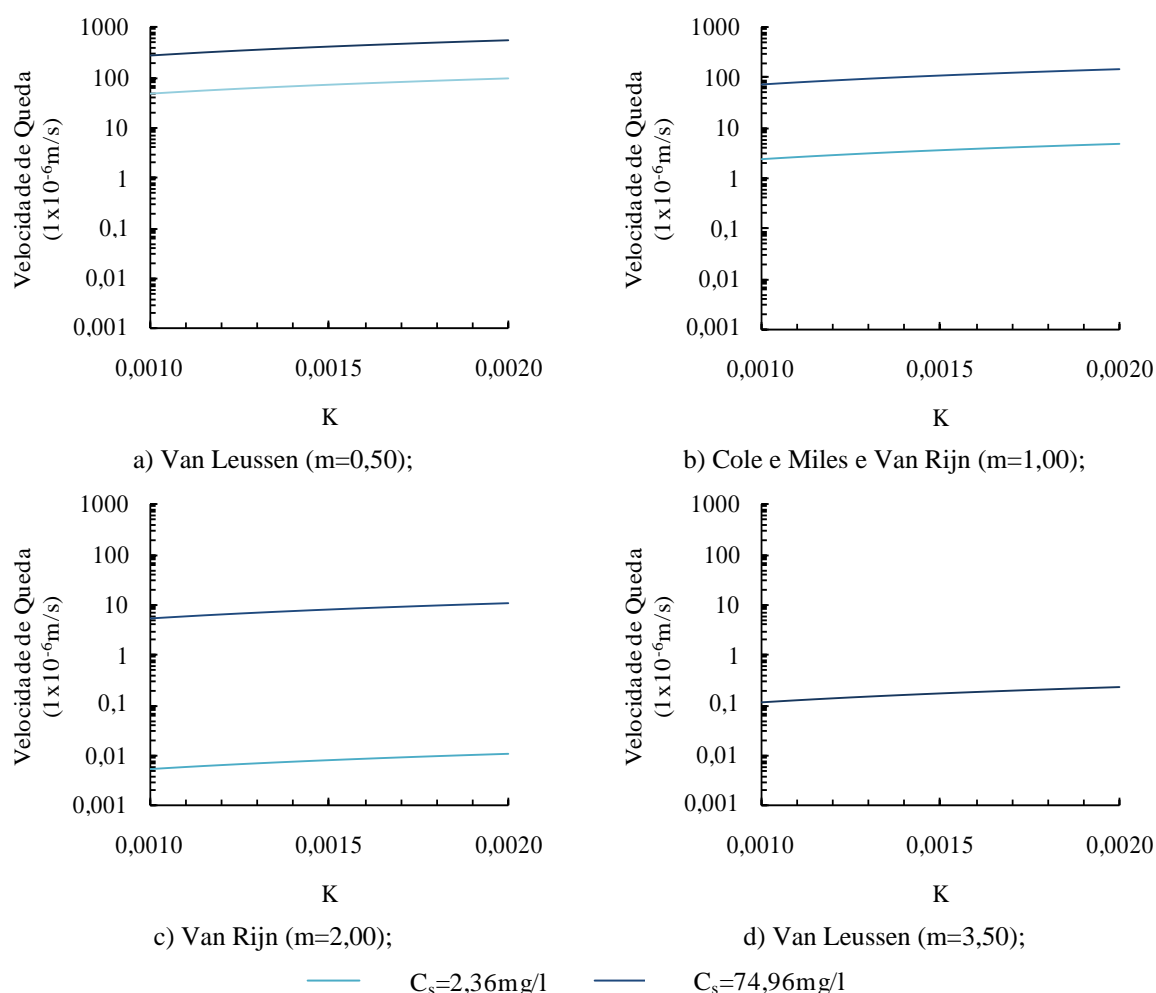


Figura 3.1: Variação da velocidade de queda com a constante K .

Da análise da Figura 3.1 verifica-se, que para todos os autores, à medida que o valor da constante K aumenta a velocidade de queda também aumenta, independentemente do valor

de concentração de matéria particulada em suspensão. Contudo, na Figura 3.1d) a variação da velocidade de queda em função de K , para um $C_s=2,36\text{mg/l}$, não está representada, pois apresenta valores extremamente baixos (entre valores da ordem de grandeza de 10^{-13} e de 10^{-12}).

Ao comparar-se a velocidade de queda dos diferentes autores nos gráficos da Figura 3.1, conclui-se que esta apresenta o mesmo comportamento para os diferentes valores da constante K . Porém, para um mesmo valor de K e C_s , a velocidade de queda apresenta uma discrepância significativa de valores, podendo existir diferenças de várias ordens de grandeza. Assim, o valor da constante K não é o parâmetro que mais influencia na determinação da velocidade de queda para baixas concentrações de sedimentos (equação 3.4).

3.2.2 Relação entre a velocidade de queda e a constante m

À semelhança do realizado na secção anterior, nesta análise, também se estimou a velocidade de queda para baixas concentrações de sedimentos a partir da equação 3.4 e recorreu-se aos valores da concentração de matéria particulada em suspensão (C_s) que caracterizam os limites mínimos e máximos da Ria de Aveiro. Porém, nesta secção analisou-se a relação entre a velocidade de queda e as constantes empíricas m propostas por Van Rijn e por Van Leussen, que variam entre 1,00 e 2,00, e 0,50 e 3,50, respectivamente (Tabela 3.4). Desta análise resulta o comportamento que se ilustra na Figura 3.2.

Tabela 3.4: Pressupostos admitidos no estudo da relação entre a velocidade de queda e a constante m .

Variável	Análise	
	a) $K=0,001$	b) $K=0,002$
C_s (g/l)	$2,36 \times 10^{-3}$ e $74,96 \times 10^{-3}$	
m Van Rijn	1,00-2,00	
Van Leussen	0,50-3,50	

Da relação entre a velocidade de queda e a constante empírica m (Figura 3.2), constata-se que à medida que a constante m aumenta existe uma diminuição da velocidade de queda, devido aos valores da concentração de matéria particulada em suspensão adoptados. Esta constatação é independente dos valores de C_s e K adoptados.

Também se verifica, que os valores da velocidade de queda de Van Rijn coincidem em parte com os valores de Van Leussen, pois o intervalo de valores da constante empírica m sugerido por Van Rijn está dentro do intervalo de valores proposto por Van Leussen.

Assim, o intervalo de valores sugerido por Van Leussen é maior do que o proposto por Van Rijn, levando a que a variação dos valores da velocidade de queda seja mais significativa.

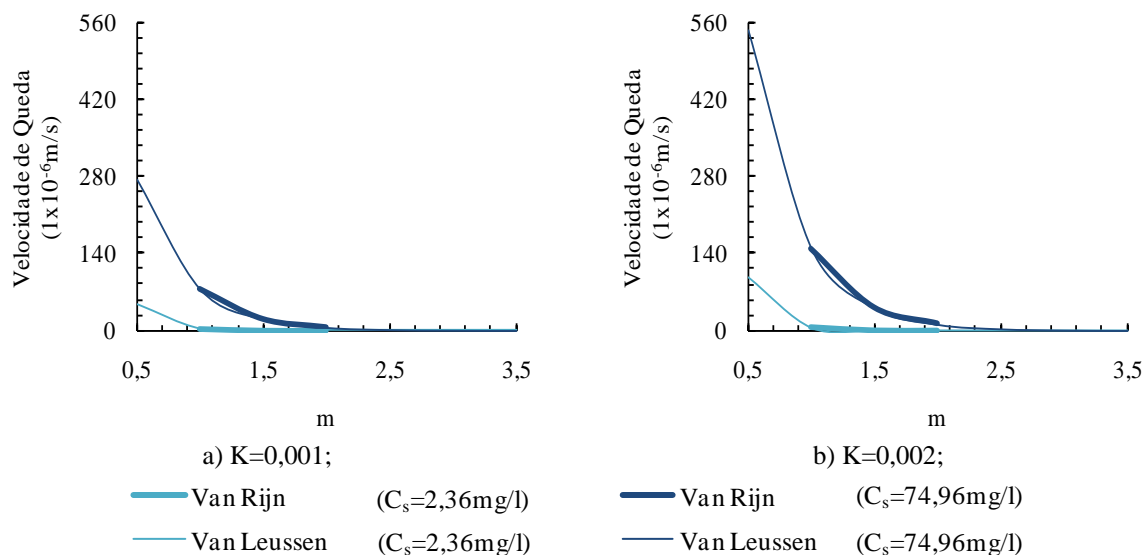


Figura 3.2: Variação da velocidade de queda com a constante m .

Para as propostas de Van Rijn e de Van Leussen, a variação da velocidade de queda com a constante empírica m é mais significativa quando a concentração de sedimentos em suspensão é menor.

Desta análise conclui-se que o valor da constante empírica m influencia mais do que o valor da constante K na determinação da velocidade de queda para baixas concentrações de sedimentos (equação 3.4).

3.2.3 Relação entre a velocidade de queda e a concentração de matéria particulada em suspensão

Para analisar a dependência da velocidade de queda em relação à concentração de matéria particulada em suspensão, recorreu-se à equação 3.3 proposta por Krone, e à equação 3.4 utilizada por Cole e Miles, por Van Rijn e por Van Leussen, e foram assumidos valores de C_s entre 2,36mg/l e 74,96mg/l, de acordo com os limites já referidos e que caracterizam a Ria de Aveiro. Também se recorreu à equação 3.9 de Nicholson e O'Connor, contudo, nesta equação, devido à gama de valores assumidos para C_s , apenas foi utilizada a expressão referente a concentrações não superiores a $C_H=25\text{g/l}$. Na Tabela 3.5 apresentam-se os pressupostos admitidos para cada um dos autores e na Figura 3.3 apresentam-se as respectivas curvas dos resultados.

Tabela 3.5: Pressupostos admitidos no estudo da relação entre a velocidade de queda e a concentração de matéria particulada em suspensão.

Autor	Variável		
	K	C_s (g/l)	m
Krone	0,001	$2,36 \times 10^{-3} - 74,96 \times 10^{-3}$	1,33
Cole e Miles	0,001		1,00
	0,002		1,00
Van Rijn	0,001		1,00
	0,002		1,00
	0,001		2,00
	0,002		2,00
Nicholson e O'Connor	0,0006		1,00
Van Leussen	0,001		0,50
	0,002		0,50
	0,001		3,50
	0,002		3,50

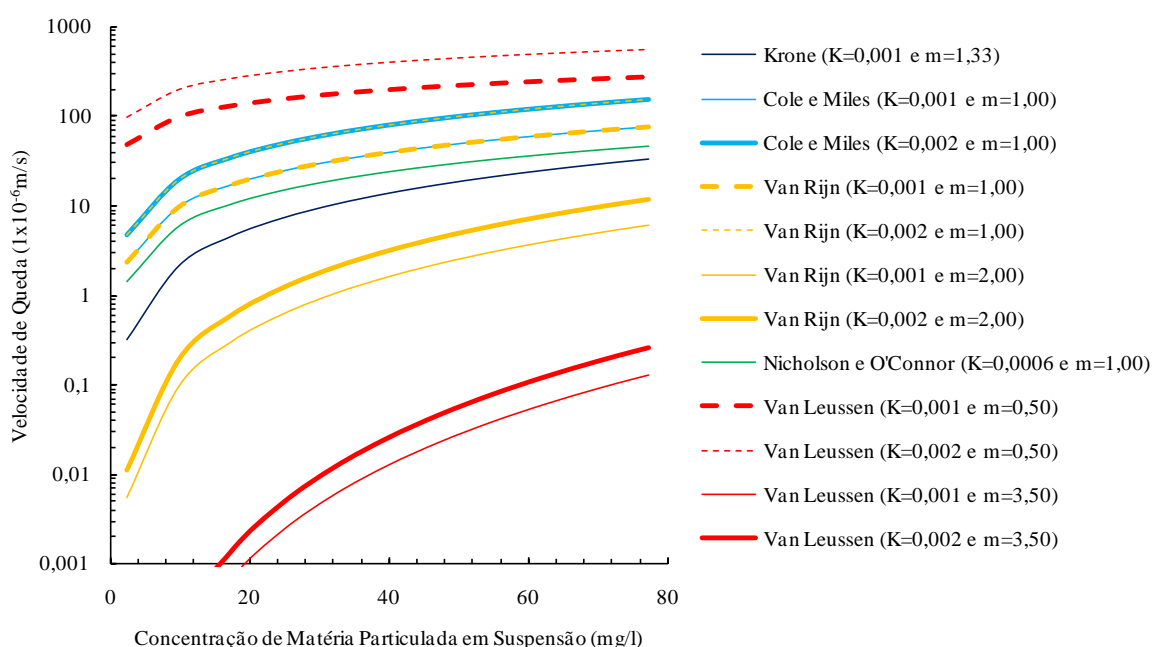


Figura 3.3: Variação da velocidade de queda com a concentração de matéria particulada em suspensão.

Ao analisar a dependência da velocidade de queda com a concentração de matéria particulada em suspensão, foi possível verificar que a velocidade de queda cresce indefinidamente com o aumento da concentração de matéria particulada em suspensão. Contudo, a diferença de resultados é significativa e há resultados de formulações que, para baixas concentrações, são maiores que outros resultados para altas concentrações.

Os valores mais altos de velocidade de queda são obtidos por Van Leussen considerando $K=0,002$ e $m=0,50$. Os valores mais baixos de velocidade de queda são obtidos pelo mesmo autor, mas considerando $K=0,001$ e $m=3,50$. Assim, os extremos obtidos com estas

formulações e com estes pressupostos, são uma velocidade de queda mínima de $6,39 \times 10^{-13} \text{ m/s}$ e um valor máximo de $5,56 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.

3.2.4 Estudo da sensibilidade das variáveis para a determinação do parâmetro de dissipação, G

Para determinar os valores do parâmetro de dissipação é necessário, segundo a equação 3.6, calcular a taxa de dissipação de energia cinética da turbulência (equação 3.7), que, por sua vez, depende da velocidade de atrito (equação 3.8), e calcular a viscosidade cinemática da água.

A viscosidade cinemática da água (ν) depende da temperatura à qual a água se encontra. Utilizando-se um valor de temperatura de $16,50^\circ\text{C}$ (resultado da 1ª campanha de campo do projecto MURANO, que pretende caracterizar o comportamento do transporte de sedimentos coesivos na Ria de Aveiro), a viscosidade cinemática da água é estimada em $1,12 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

3.2.4.1 Relação entre a velocidade de atrito e a velocidade média do escoamento

Na análise da relação entre a velocidade de atrito e a velocidade média do escoamento foram adoptadas quatro situações, conjugando valores mínimos e máximos de n e h . Para n , considerou-se o valor mínimo da Tabela 3.1 ($n=0,017 \text{ s/m}^{1/3}$) e o valor máximo da Tabela 3.2 ($n=0,150 \text{ s/m}^{1/3}$). Os valores de h adoptados, correspondem a situações de alturas do escoamento bastante extremas na Ria de Aveiro, representando um pequeno canal, com apenas 20cm de água ($h=0,20 \text{ m}$), ou um canal principal, com $h=10,00 \text{ m}$. No cálculo da velocidade de atrito para as quatro situações, variou-se a velocidade média do escoamento entre 0,00 e $2,50 \text{ m/s}$, que correspondem a valores comuns para os canais da Ria de Aveiro. Os pressupostos expostos anteriormente encontram-se sintetizados na Tabela 3.6, dos quais resultaram as curvas apresentadas na Figura 3.4.

Tabela 3.6: Pressupostos admitidos no estudo da relação entre a velocidade de atrito e a velocidade média do escoamento.

Situações	Variável	
	n ($\text{s/m}^{1/3}$)	h (m)
1	0,017	0,20
2	0,150	0,20
3	0,017	10,00
4	0,015	10,00

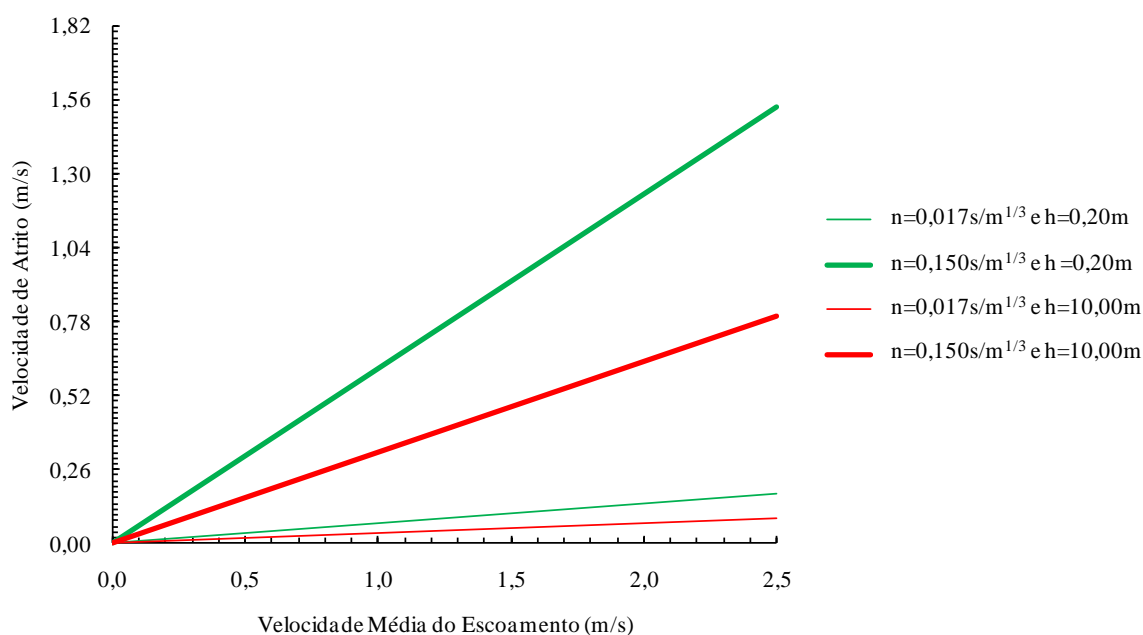


Figura 3.4: Variação da velocidade de atrito com a velocidade média do escoamento.

Pela observação da Figura 3.4 chegou-se à conclusão que, nas quatro situações estudadas a velocidade de atrito aumenta com o aumento da velocidade média do escoamento. Os valores mais altos de velocidade de atrito são alcançados na situação em que $n=0,150\text{s/m}^{1/3}$ e $h=0,20\text{m}$, pelo que se pode concluir que a velocidade de atrito aumenta com o aumento da rugosidade e com a diminuição da altura do escoamento.

3.2.4.2 Relação entre a velocidade de atrito e a altura do escoamento

No estudo da relação entre a velocidade de atrito e a altura do escoamento, fez-se variar o valor da altura do escoamento entre 0,10 e 10,00m e fixou-se a velocidade média do escoamento (Figura 3.5). Os valores de velocidade média do escoamento adoptados foram 0,50 e 2,50m/s e os valores do coeficiente de rugosidade de Manning (n) foram os mesmos da análise anterior. Estes pressupostos encontram-se resumidos na Tabela 3.7 e na Figura 3.5 apresenta-se o gráfico com os respectivos resultados.

Tabela 3.7: Pressupostos admitidos no estudo da relação entre a velocidade de atrito e a altura do escoamento.

Situações	Variável	
	n ($\text{s/m}^{1/3}$)	\bar{U} (m)
1	0,017	0,50
2	0,150	0,50
3	0,017	2,50
4	0,150	2,50

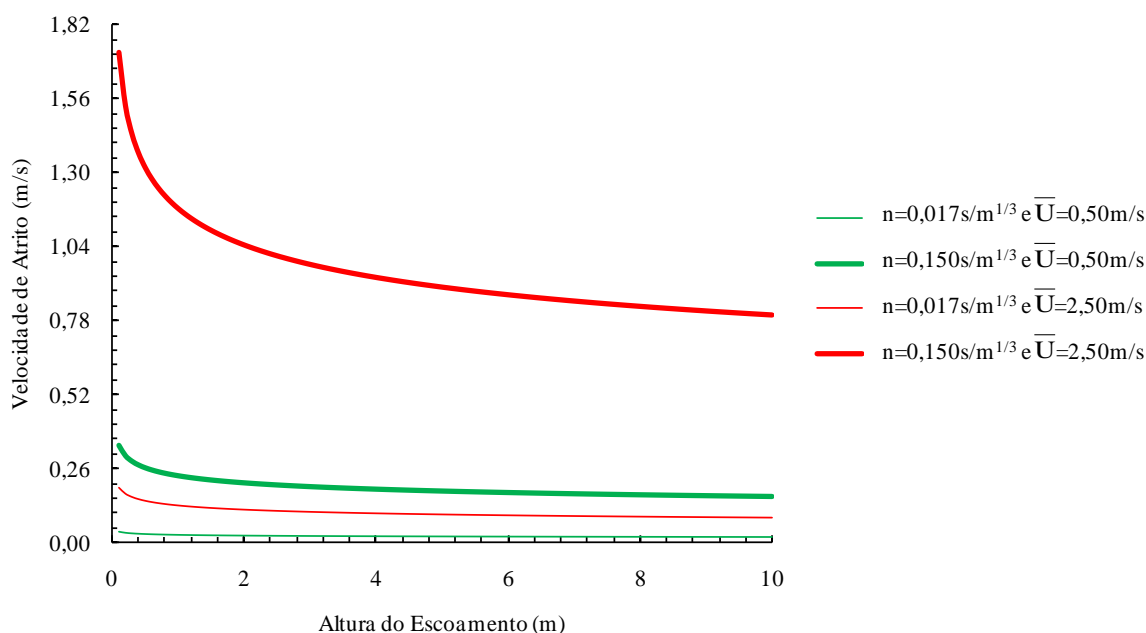


Figura 3.5: Variação da velocidade de atrito com a altura do escoamento.

Da Figura 3.5, em que se analisou a variação da velocidade de atrito com a altura do escoamento, verifica-se que à medida que a altura do escoamento aumenta a velocidade de atrito diminui, sendo a situação de maior rugosidade e maior velocidade média do escoamento ($n=0,150\text{s/m}^{1/3}$ e $\bar{U}=2,50\text{m/s}$) a que apresenta maiores valores de velocidade de atrito.

À semelhança da análise anterior, chega-se à conclusão que a velocidade de atrito aumenta com o aumento do coeficiente de rugosidade de Manning. Nesta análise também se conclui que a velocidade de atrito aumenta à medida que a velocidade média do escoamento aumenta.

3.2.4.3 Relação entre a taxa de dissipação (ϵ) e a distância ao fundo

Após estudar a velocidade de atrito, determinou-se a taxa de dissipação de energia cinética da turbulência, de acordo com a equação proposta por Nezu e Nakagawa (equação 3.7), para as quatro situações analisadas na secção 3.2.4.1, conjugando alturas do escoamento e rugosidades, e considerando uma velocidade média do escoamento de 2,50m/s. Assim, a taxa de dissipação foi determinada em duas situações: para uma altura do escoamento de 0,20m, mas com diferentes valores de velocidade de atrito, nomeadamente, 0,174 e 1,536m/s; e para uma altura do escoamento de 10,00m e velocidades de atrito de 0,091 e

0,800m/s (Tabela 3.8). Na Figura 3.6 demonstram-se graficamente os resultados das análises.

Tabela 3.8: Pressupostos admitidos no estudo da relação entre a taxa de dissipação e a distância ao fundo.

Análise	Velocidades de Atrito para $\bar{U}=2,50\text{m/s}$ (m/s)	
	$n=0,017\text{s/m}^{1/3}$	$n=0,150\text{s/m}^{1/3}$
a) $h=0,20\text{m}$	0,174	1,536
b) $h=10,00\text{m}$	0,091	0,800

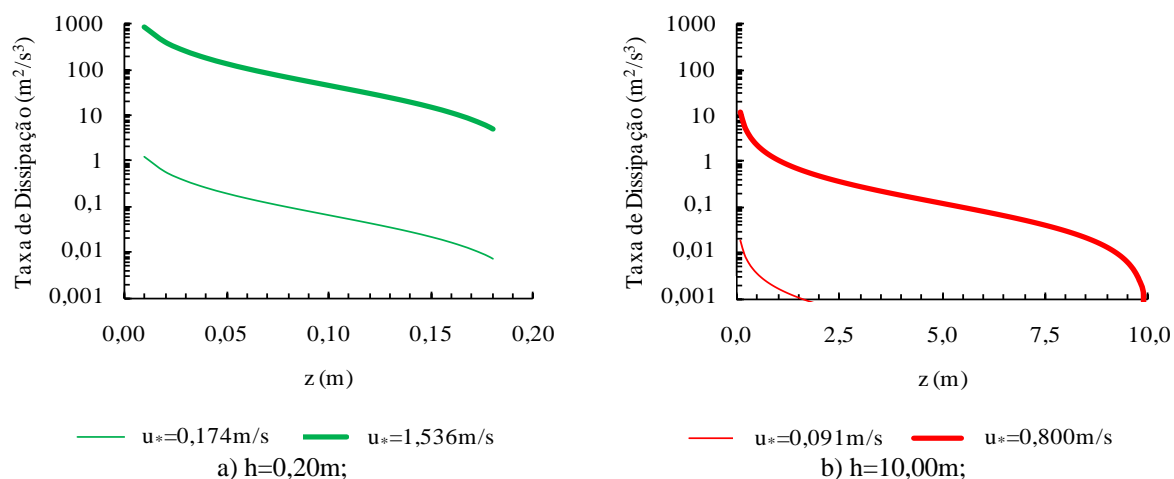


Figura 3.6: Variação da taxa de dissipação com a distância ao fundo.

Da relação entre a taxa de dissipação e a distância ao fundo (z), verifica-se que à medida que z aumenta a taxa de dissipação diminui, independentemente da altura do escoamento e respectivo valor da velocidade de atrito. Também é possível verificar que a situação de velocidade de atrito de 1,536m/s é aquela que apresenta maiores valores de taxa de dissipação, pois na formulação de Nezu e Nakagawa, a taxa de dissipação é proporcional ao cubo da velocidade de atrito.

3.2.4.4 Relação entre o parâmetro de dissipação (G) e a distância ao fundo

Com os valores da taxa de dissipação obtidos das diferentes situações analisadas na Figura 3.6 e com o valor da viscosidade cinemática da água referido em 3.2.4, tornou-se possível estimar valores do parâmetro de dissipação, como se apresenta na Figura 3.7.

Da Figura 3.7 verifica-se que, para ambas as situações, à medida que a distância ao fundo (z) aumenta o parâmetro de dissipação diminui.

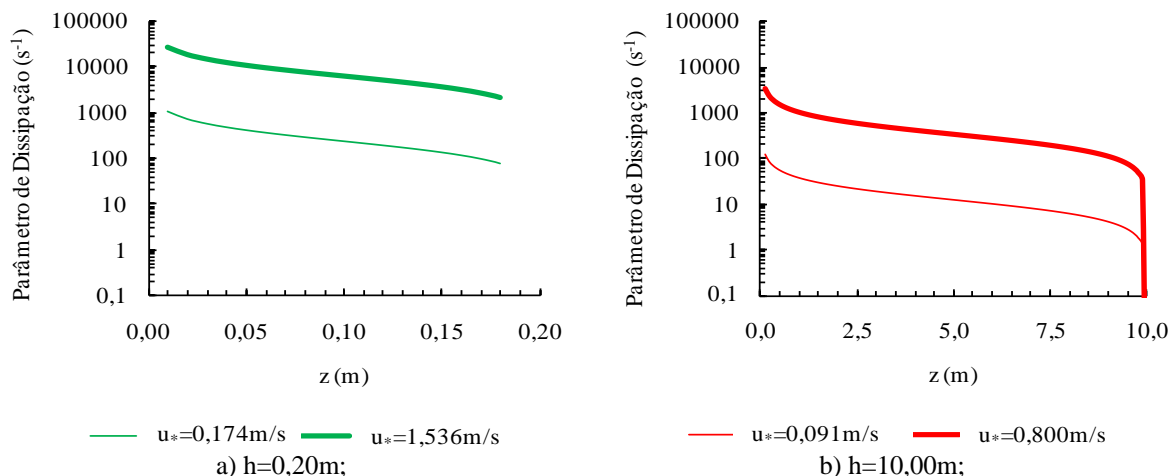


Figura 3.7: Variação do parâmetro de dissipação com a distância ao fundo.

Ao comparar as curvas referentes a uma altura do escoamento de 0,20m (Figura 3.7a), constata-se que aquela que apresenta maiores valores do parâmetro de dissipação é a que corresponde à velocidade de atrito de 1,536m/s. Na comparação das curvas referentes a um $h=10,00\text{m}$ (Figura 3.7b), a da velocidade de atrito de 0,800m/s é a que mostra maiores valores do parâmetro de dissipação. Destas duas comparações chega-se à conclusão que independentemente do valor da altura do escoamento, os maiores valores de G são resultado de um coeficiente de rugosidade de Manning de $0,150\text{s/m}^{1/3}$.

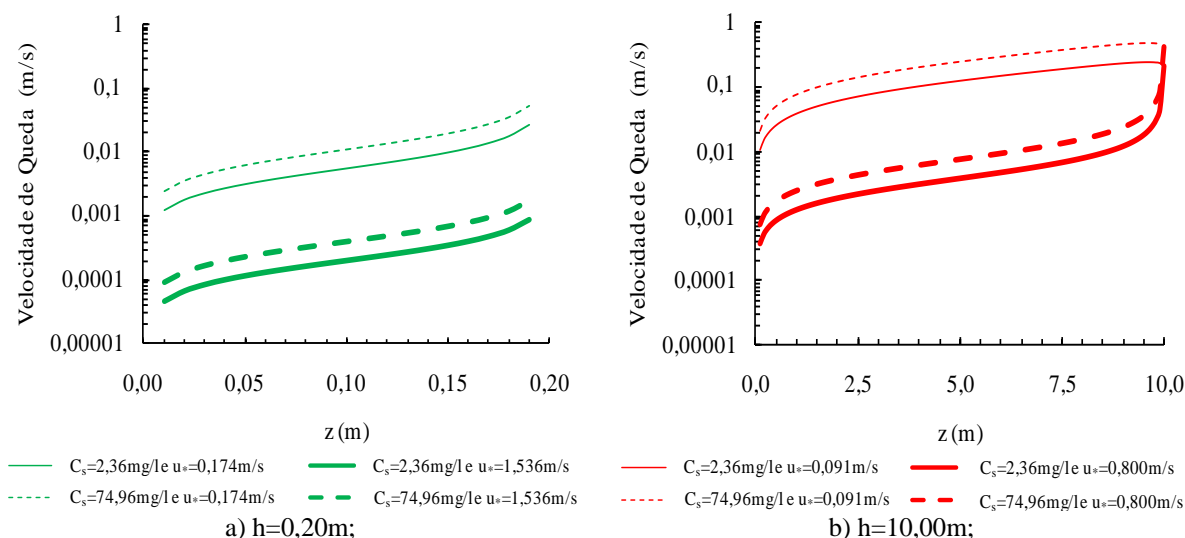
Em suma, quanto maior for a velocidade de atrito maior é a dissipação de energia, pois existe maior resistência ao escoamento.

3.2.5 Relação entre a velocidade de queda e a distância ao fundo

A partir dos valores de G obtidos anteriormente, e admitindo para os valores de K , m , a e b , o obtido por Spearman e Roberts (segundo Trento, 2005) na simulação da sedimentação no estuário do rio Tamar, em Inglaterra (secção 3.1.2.1), determinou-se a velocidade de queda pela equação 3.5, proposta por Van Leussen, para os valores mínimo e máximo de concentração de matéria particulada em suspensão já adoptados anteriormente, nomeadamente, 2,36mg/l e 74,96mg/l (Figura 3.8).

Da observação da Figura 3.8a, para valores de velocidade de atrito de 0,174m/s e de 1,536m/s, verifica-se que a velocidade de queda aumenta à medida que há uma aproximação à superfície da água. Em relação à Figura 3.8b, para uma velocidade de atrito de 0,800m/s, a velocidade de queda também aumenta com a distância ao fundo, enquanto, para uma velocidade de atrito de 0,091m/s, a velocidade de queda aumenta até um valor de

$z \approx 9,60\text{m}$ e depois diminui. Esta diminuição da velocidade de queda deve-se ao valor do parâmetro de dissipação. Apenas na situação de $u_* = 0,091\text{m/s}$ é que este parâmetro assume valores próximos de $2,55\text{s}^{-1}$, valor para o qual, Spearman e Roberts, constataram uma diminuição de velocidade de queda, como referido na secção 3.1.2.1.



Desta análise pode-se concluir que a velocidade de queda aumenta com a aproximação à superfície, pois nesta zona a dissipação de energia é menor, logo a turbulência é menor e os sedimentos tendem a depositar.

3.2.6 Relação entre a velocidade de queda e a velocidade média do escoamento

Para a determinação da velocidade de queda, segundo a equação 3.10 proposta por Burban *et al.* (de acordo com Huang *et al.*, 2006), foi necessário estimar valores de a , b e d_m . No cálculo destes parâmetros recorreu-se às equações 3.11, 3.12 e 3.13, respectivamente, onde a tensão tangencial no fundo foi determinada de acordo com a equação 3.16.

Para a obtenção dos valores da tensão tangencial no fundo consideraram-se novamente as situações conjugadas da altura do escoamento e da rugosidade, estudadas para a definição da velocidade de atrito (secção 3.2.4.1). Assim, na Tabela 3.9 apresentam-se alguns valores da velocidade média do escoamento e respectivos resultados da tensão tangencial no fundo.

Para estudar a relação entre a velocidade de queda e a velocidade média do escoamento segundo Burban *et al.* consideraram-se duas situações: uma para o valor mínimo da

concentração de sedimentos em suspensão (Figura 3.9a) e outra para o valor máximo (Figura 3.9b).

Tabela 3.9: Tensões tangenciais no fundo (N/m^2).

\bar{U} (m/s)	h=0,20m		h=10,00m	
	n=0,017s/m ^{1/3}	n=0,150s/m ^{1/3}	n=0,017s/m ^{1/3}	n=0,150s/m ^{1/3}
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000
0,05	0,012	0,944	0,003	0,256
0,10	0,048	3,774	0,013	1,025
0,15	0,109	8,492	0,030	2,305
0,20	0,194	15,097	0,053	4,098
0,50	1,212	94,359	0,329	25,613
0,70	2,375	184,943	0,645	50,201
1,00	4,848	377,434	1,316	102,451
1,10	5,866	456,696	1,592	123,966
1,50	10,908	849,227	2,961	230,516
2,00	19,392	1509,738	5,264	409,806
2,50	30,300	2358,965	8,225	640,322

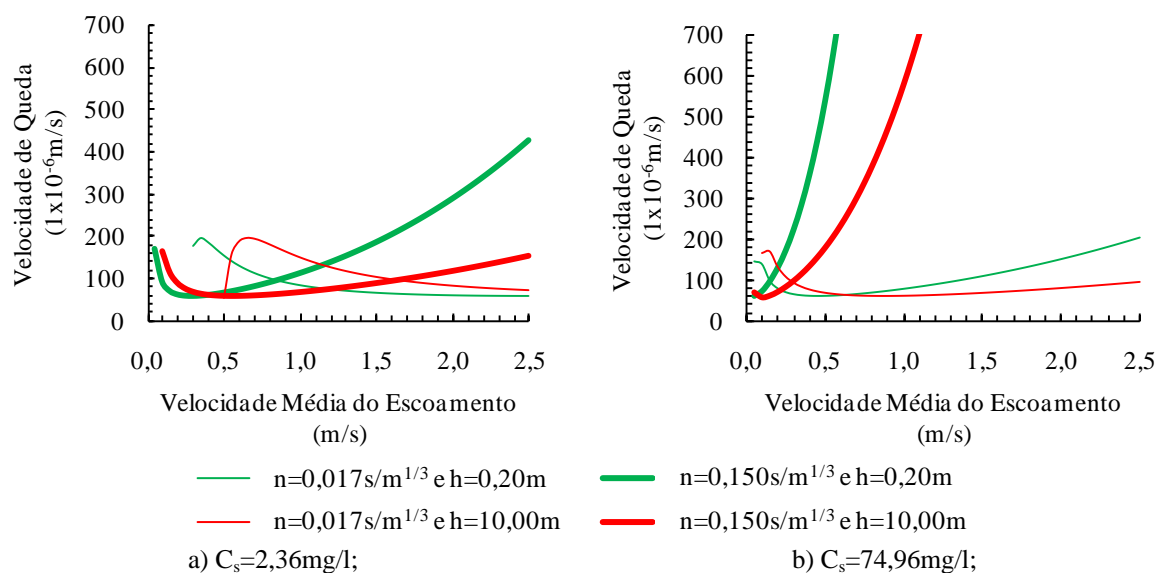


Figura 3.9: Variação da velocidade de queda com a velocidade média do escoamento.

Pela observação da Figura 3.9a, verifica-se que para uma rugosidade de $0,017\text{s/m}^{1/3}$, a velocidade de queda aumenta até uma certa velocidade média do escoamento e depois decresce. Para uma altura do escoamento de $0,20\text{m}$, a velocidade de queda aumenta até uma velocidade média do escoamento de $0,35\text{m/s}$, enquanto, para um $h=10,00\text{m}$, a velocidade de queda aumenta até $0,65\text{m/s}$. Também se apura que para uma rugosidade de $0,150\text{s/m}^{1/3}$ e uma altura do escoamento de $0,20\text{m}$, a velocidade de queda diminui até uma velocidade média do escoamento de $0,30\text{m/s}$ e depois cresce, enquanto, para um $h=10,00\text{m}$, a velocidade de queda diminui até $0,55\text{m/s}$. Este comportamento oposto apresentado pela velocidade de queda para os diferentes valores do coeficiente de

rugosidade de Manning deve-se às tensões tangenciais no fundo que se geram. Para elevadas rugosidades ($n=0,150\text{s/m}^{1/3}$) e baixas velocidades do escoamento, as tensões tangenciais assumem valores superiores à tensão a partir da qual, para baixas rugosidades ($n=0,017\text{s/m}^{1/3}$), se verifica a diminuição da velocidade de queda, daí o comportamento inicial das curvas referentes a uma rugosidade de $0,150\text{s/m}^{1/3}$.

Da análise da Figura 3.9b, constata-se que para um $n=0,017\text{s/m}^{1/3}$ e um $h=0,20\text{m}$, a velocidade de queda diminui até uma velocidade média do escoamento de $0,45\text{m/s}$ e depois cresce, enquanto, para a mesma rugosidade mas altura do escoamento de $10,00\text{m}$, a velocidade de queda sobe ligeiramente, decresce, e depois a partir de uma velocidade média do escoamento de $0,85\text{m/s}$ sobe novamente. Para uma rugosidade de $0,150\text{s/m}^{1/3}$ e uma altura do escoamento de $0,20\text{m}$, a velocidade de queda aumenta à medida que a velocidade do escoamento aumenta, enquanto, para o mesmo valor de n mas $h=10,00\text{m}$, a velocidade de queda diminui até uma velocidade média do escoamento de $0,10\text{m/s}$ e depois cresce. Estes comportamentos apresentados pelas curvas da Figura 3.9b também se devem aos respectivos valores da tensão tangencial. Para baixas rugosidades e elevadas alturas do escoamento, a velocidade de queda diminui entre os valores da tensão tangencial de $0,03$ e $1,00\text{N/m}^2$, originados por velocidades médias do escoamento de $0,15$ e $0,85\text{m/s}$, respectivamente. Para a mesma rugosidade mas para baixas alturas do escoamento, o comportamento é semelhante, mas os valores da velocidade média do escoamento são menores, correspondendo aos limites de $0,05$ e de $0,45\text{m/s}$.

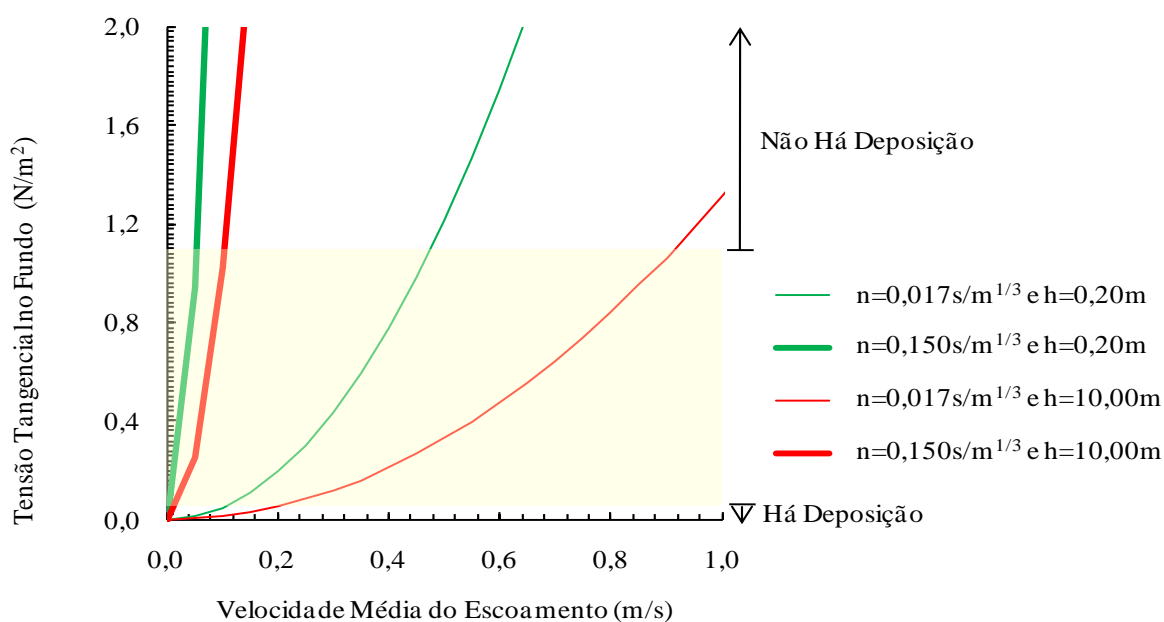
Em suma, para baixas rugosidades e baixas concentrações de sedimentos em suspensão, a velocidade de queda aumenta e depois diminui. Para elevadas concentrações de sedimentos já não se verifica o mesmo, pois o aumento da velocidade média do escoamento leva ao aumento da velocidade de queda. Quando a rugosidade é elevada, a velocidade de queda aumenta com o aumento da velocidade média do escoamento. Este aumento ocorre de forma mais acentuada para elevadas concentrações sedimentares.

3.3 Condições de deposição

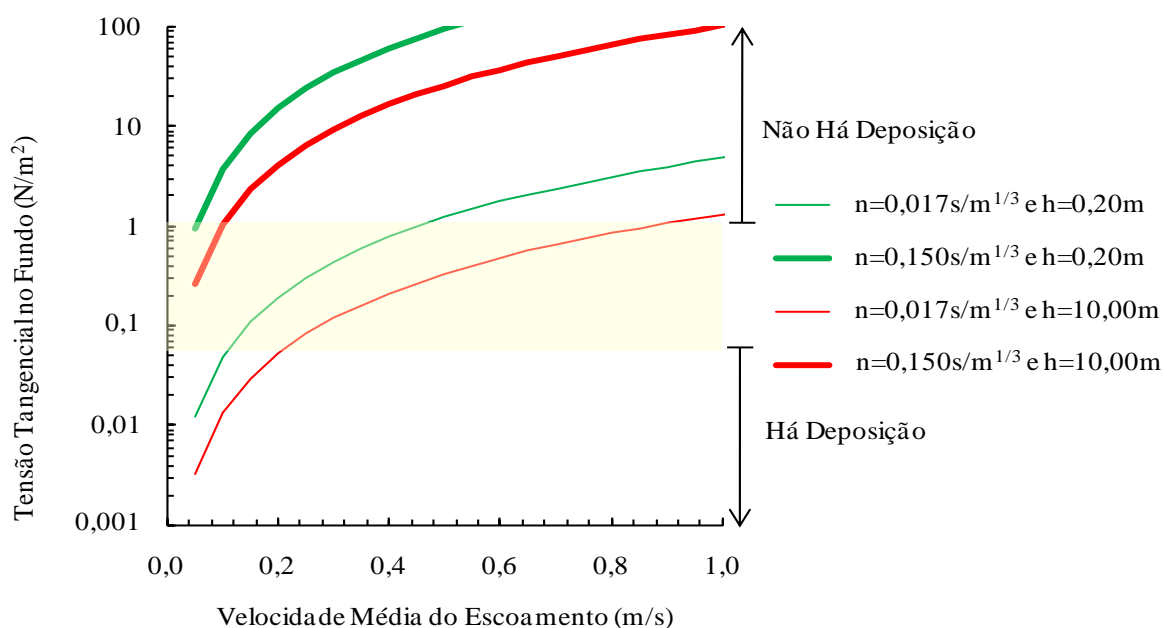
De acordo com o critério de situações extremas adoptado, na análise da dependência da tensão tangencial relativamente à velocidade média do escoamento foram consideradas as situações já estudadas na secção 3.2.4.1 para a determinação da velocidade de atrito, em

que se conjugaram valores mínimos e máximos de n e h , e se variou a velocidade média do escoamento entre 0,00 e 2,50m/s.

Esta análise foi efectuada ao nível do fundo ($z=0\text{m}$), pois é a este nível que se pretende saber se há ou não há deposição. Assim, os valores da tensão tangencial foram os obtidos anteriormente. A amarelo claro representa-se o intervalo de valores que se assumiu para $\tau_{d,total}$, e que variam entre 0,06 e 1,10N/m², os quais correspondem aos extremos sugeridos pelos diferentes autores analisados na secção 3.1.3.2.



a) Representação linear;



b) Representação em escala logarítmica;

Figura 3.10: Variação da tensão tangencial no fundo com a velocidade média do escoamento.

Independentemente da rugosidade e da altura do escoamento, a tensão tangencial no fundo aumenta com o aumento da velocidade média do escoamento, como se observa na Figura 3.10, pois esta é proporcional à velocidade de atrito que, por sua vez é proporcional à tensão tangencial no fundo. Assim, na Tabela 3.10 apresenta-se um resumo da análise das curvas anteriores. Entre os valores da velocidade média do escoamento mencionados, poderá haver condições para deposição ou não, consoante o valor da tensão tangencial crítica de deposição total ($\tau_{d,total}$).

Tabela 3.10: Análise das curvas resultantes da variação da tensão tangencial no fundo com a velocidade média do escoamento.

h (m)	n (s/m ^{1/3})	\bar{U} (m/s)	Deposição
0,20	0,017	< 0,15	Espera-se que aconteça.
		> 0,45	Não se espera que aconteça.
	0,150	< 0,10	Espera-se que aconteça.
		≥ 0,10	Não se espera que aconteça.
10,00	0,017	< 0,25	Espera-se que aconteça.
		> 0,90	Não se espera que aconteça.
	0,150	< 0,05	Espera-se que aconteça.
		> 0,10	Não se espera que aconteça.

3.3.1 Taxas de deposição

Para determinar taxas de deposição pela fórmula de Krone (equação 3.1), estimaram-se anteriormente velocidades de queda de acordo com diferentes autores. Contudo, também é necessário estimar probabilidades de deposição. Para tal, recorreu-se à equação 3.14, onde os valores da tensão tangencial no fundo utilizados foram os que resultaram das análises efectuadas anteriormente, e foram admitidos para $\tau_{d,total}$ os valores 0,06 e 1,10N/m² (também referidos anteriormente). Contudo, só foram determinadas probabilidades de deposição para as velocidades médias do escoamento apresentadas na Tabela 3.11, pois para velocidades superiores a 1,10m/s nunca há deposição, independentemente de qualquer das outras condições que o escoamento possa apresentar.

Da Tabela 3.11 verifica-se que para uma determinada tensão tangencial crítica de deposição total, altura do escoamento e rugosidade, à medida que a velocidade média do escoamento aumenta a probabilidade de deposição diminui. Também se verifica que para elevadas rugosidades e para $\tau_{d,total}=0,06\text{N/m}^2$ não há deposição, pois os valores da tensão tangencial associados às velocidades do escoamento apresentadas são superiores ao valor da tensão tangencial crítica de deposição total. Para os mesmos valores da velocidade

média e da altura do escoamento, mas diferentes coeficientes de rugosidade, verifica-se que a probabilidade de deposição diminui, pois a velocidade de atrito junto ao fundo é maior levando a que a tensão tangencial seja maior, e assim os sedimentos não depositam tanto.

Tabela 3.11: Probabilidades de deposição (nd - não há deposição).

\bar{U} (m/s)	$\tau_{d,total}=0,06$ (N/m ²)				$\tau_{d,total}=1,10$ (N/m ²)			
	h=0,20 (m)		h=10,00 (m)		h=0,20 (m)		h=10,00 (m)	
	n=0,017 (s/m ^{1/3})	n=0,150 (s/m ^{1/3})	n=0,017 (s/m ^{1/3})	n=0,150 (s/m ^{1/3})	n=0,017 (s/m ^{1/3})	n=0,150 (s/m ^{1/3})	n=0,017 (s/m ^{1/3})	n=0,150 (s/m ^{1/3})
0,05	0,80	nd	0,95	nd	0,99	0,14	1,00	0,77
0,10	0,19	nd	0,78	nd	0,96	nd	0,99	0,07
0,15	nd	nd	0,51	nd	0,90	nd	0,97	nd
0,20	nd	nd	0,12	nd	0,82	nd	0,95	nd
0,70	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,41	nd
1,10	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd

Com os valores da probabilidade de deposição e com os valores das velocidades de queda estimadas segundo diferentes autores foi possível quantificar valores da taxa de deposição. Na Tabela 3.12 e na Tabela 3.13 representam-se taxas de deposição para concentrações de matéria particulada em suspensão de 2,36mg/l e de 74,96mg/l, respectivamente, e valores de velocidade de queda segundo Van Rijn ($K=0,001$ e $m=2,00$), enquanto, na Tabela 3.14 e na Tabela 3.15 representam-se as taxas de deposição das mesmas condições, mas para valores de velocidade de queda estimadas segundo Cole e Miles ($K=0,002$ e $m=1,00$).

Como para elevadas rugosidades ($n=0,150\text{s/m}^{1/3}$) e baixa tensão tangencial crítica de deposição total ($\tau_{d,total}=0,06\text{N/m}^2$) não há deposição, nas Tabelas 3.12 a 3.15 não se apresentam estas colunas.

Tabela 3.12: Taxas de deposição ($1 \times 10^{-6}\text{g/m}^2/\text{s}$) para $C_s=2,36\text{mg/l}$ e $w=5,57 \times 10^{-9}\text{m/s}$.

\bar{U} (m/s)	$\tau_{d,total}=0,06$ (N/m ²)		$\tau_{d,total}=1,10$ (N/m ²)			
	h=0,20 (m)	h=10,00 (m)	h=0,20 (m)		h=10,00 (m)	
	n=0,017 (s/m ^{1/3})	n=0,150 (s/m ^{1/3})	n=0,017 (s/m ^{1/3})	n=0,150 (s/m ^{1/3})	n=0,017 (s/m ^{1/3})	n=0,150 (s/m ^{1/3})
0,05	0,010	0,012	0,013	0,002	0,013	0,010
0,10	0,003	0,010	0,013	-	0,013	0,001
0,15	-	0,007	0,012	-	0,013	-
0,20	-	0,002	0,011	-	0,013	-
0,70	-	-	-	-	0,005	-
1,10	-	-	-	-	-	-

Tabela 3.13: Taxas de deposição ($1 \times 10^{-6} \text{ g/m}^2/\text{s}$) para $C_s=74,96 \text{ mg/l}$ e $w=5,62 \times 10^{-6} \text{ m/s}$.

\bar{U} (m/s)	$\tau_{d,\text{total}}=0,06$ (N/m^2)		$\tau_{d,\text{total}}=1,10$ (N/m^2)			
	h=0,20 (m)	h=10,00 (m)	h=0,20 (m)		h=10,00 (m)	
	n=0,017 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,017 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,017 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,150 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,017 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,150 ($\text{s/m}^{1/3}$)
0,05	336	398	417	60	420	323
0,10	81	329	403	-	416	29
0,15	-	213	379	-	410	-
0,20	-	52	347	-	401	-
0,70	-	-	-	-	174	-
1,10	-	-	-	-	-	-

Tabela 3.14: Taxas de deposição ($1 \times 10^{-6} \text{ g/m}^2/\text{s}$) para $C_s=2,36 \text{ mg/l}$ e $w=4,72 \times 10^{-6} \text{ m/s}$.

\bar{U} (m/s)	$\tau_{d,\text{total}}=0,06$ (N/m^2)		$\tau_{d,\text{total}}=1,10$ (N/m^2)			
	h=0,20 (m)	h=10,00 (m)	h=0,20 (m)		h=10,00 (m)	
	n=0,017 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,017 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,017 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,150 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,017 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,150 ($\text{s/m}^{1/3}$)
0,05	9	11	11	2	11	9
0,10	2	9	11	-	11	1
0,15	-	6	10	-	11	-
0,20	-	1	9	-	11	-
0,70	-	-	-	-	5	-
1,10	-	-	-	-	-	-

Tabela 3.15: Taxas de deposição ($1 \times 10^{-6} \text{ g/m}^2/\text{s}$) para $C_s=74,96 \text{ mg/l}$ e $w=1,50 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.

\bar{U} (m/s)	$\tau_{d,\text{total}}=0,06$ (N/m^2)		$\tau_{d,\text{total}}=1,10$ (N/m^2)			
	h=0,20 (m)	h=10,00 (m)	h=0,20 (m)		h=10,00 (m)	
	n=0,017 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,017 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,017 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,150 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,017 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,150 ($\text{s/m}^{1/3}$)
0,05	8968	10622	11114	1598	11204	8621
0,10	2158	8773	10743	-	11104	771
0,15	-	5692	10124	-	10936	-
0,20	-	1379	9257	-	10700	-
0,70	-	-	-	-	4650	-
1,10	-	-	-	-	-	-

Nas Tabelas 3.12, 3.13, 3.14 e 3.15 verifica-se que para as situações estudadas a taxa de deposição diminui com o aumento da velocidade média do escoamento, devido à diminuição da probabilidade de deposição. Também se verifica que a taxa de deposição aumenta à medida que a altura do escoamento aumenta, pois existe maior probabilidade dos sedimentos se depositarem.

Das situações estudadas, aquela que apresenta maiores valores da taxa de deposição é a que a velocidade de queda é calculada de acordo com Cole e Miles, para um $K=0,002$ e $m=1,00$, e a concentração de matéria particulada em suspensão é de $74,96 \text{ mg/l}$ (Tabela 3.15). A que resulta em menores valores da taxa de deposição é a da velocidade de

queda segundo Van Rijn ($K=0,001$ e $m=2,00$), e concentração de matéria particulada em suspensão de $2,36\text{mg/l}$ (Tabela 3.12). Assim, a taxa de deposição aumenta com o aumento da velocidade de queda, e com o aumento da concentração de matéria particulada em suspensão.

Na Tabela 3.16 apresentam-se as taxas de deposição para velocidades de queda estimadas de acordo com Burban *et al.*, e para o valor mínimo da concentração de matéria particulada em suspensão ($C_s=2,36\text{mg/l}$) enquanto, na Tabela 3.17 se ilustram para o valor máximo de concentração de matéria particulada em suspensão ($C_s=74,96\text{mg/l}$). Nestas análises, ao contrário do que se passava anteriormente, a cada velocidade média do escoamento está associada um valor de velocidade de queda, as quais foram determinadas na secção 3.2.6. Estas velocidades de queda são, em geral, maiores que nas situações anteriores.

À semelhança das Tabelas 3.12 a 3.15, nas Tabelas 3.16 e 3.17, para elevadas rugosidades e baixa tensão tangencial crítica de deposição total não há deposição, pelo que não se apresentam as respectivas colunas.

Tabela 3.16: Taxas de deposição ($1 \times 10^{-6} \text{g/m}^2/\text{s}$) para $C_s=2,36\text{mg/l}$.

\bar{U} (m/s)	$\tau_{d,\text{total}}=0,06$ (N/m^2)		$\tau_{d,\text{total}}=1,10$ (N/m^2)			
	h=0,20 (m)	h=10,00 (m)	h=0,20 (m)		h=10,00 (m)	
	n=0,017 ($\text{s/m}^{1/3}$)		n=0,017 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,150 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,017 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,150 ($\text{s/m}^{1/3}$)
0,05	-	-	-	57373548	-	-
0,10	-	-	-	-	-	26775391
0,15	-	-	-	-	-	-
0,20	-	-	-	-	-	-
0,70	-	-	-	-	187275509	-
1,10	-	-	-	-	-	-

Tabela 3.17: Taxas de deposição ($1 \times 10^{-6} \text{g/m}^2/\text{s}$) para $C_s=74,96\text{mg/l}$.

\bar{U} (m/s)	$\tau_{d,\text{total}}=0,06$ (N/m^2)		$\tau_{d,\text{total}}=1,10$ (N/m^2)			
	h=0,20 (m)	h=10,00 (m)	h=0,20 (m)		h=10,00 (m)	
	n=0,017 ($\text{s/m}^{1/3}$)		n=0,017 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,150 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,017 ($\text{s/m}^{1/3}$)	n=0,150 ($\text{s/m}^{1/3}$)
0,05	8675868464	-	10752191267	634607552	-	4130825408
0,10	1982491132	9791789148	9869858015	-	12392625652	306139034
0,15	-	6500100828	6488324412	-	12487307989	-
0,20	-	1219543754	4813171448	-	9462704256	-
0,70	-	-	-	-	1884023978	-
1,10	-	-	-	-	-	-

Nas Tabelas 3.16 e 3.17 são escassos os valores da taxa de deposição por dois motivos. Primeiro, as probabilidades de deposição apontam para que não haja deposição (Tabela 3.11) e segundo, a formulação de Burban *et al.* não estima valores de velocidade de queda para baixas velocidades do escoamento.

Na Tabela 3.17, também é possível verificar que, a taxa de deposição diminui à medida que a velocidade média do escoamento aumenta, e aumenta com o aumento da altura do escoamento.

Ao comparar-se as Tabelas 3.16 e 3.17, conclui-se que a taxa de deposição aumenta com a concentração de matéria particulada em suspensão.

CAPÍTULO 4

EROSÃO

Neste capítulo apresenta-se outro dos mecanismos do transporte de sedimentos coesivos, a erosão.

4.1 Introdução

A erosão dos sedimentos coesivos é um mecanismo complexo, pois, como mencionado na secção 2.2.5, depende de uma série de factores, o que leva a que as equações seguidamente apresentadas sejam de natureza empírica. A erosão pode ser de vários tipos, contudo neste capítulo apenas se analisa a erosão superficial e a erosão gravítica.

Para a quantificação da erosão superficial determinaram-se as respectivas taxas, com base nas equações propostas por Ariathurai e Partheniades (de acordo com Huang *et al.*, 2006) e por Parchure e Mehta (1985). Não foi quantificada a taxa para a erosão gravítica. Apesar disso, quantificou-se a tensão tangencial crítica de erosão gravítica, pela equação proposta por Hwang e Mehta (segundo Huang *et al.*, 2006).

4.2 Taxa de erosão superficial

A equação para a determinação da taxa de erosão superficial (Q_{es}) apresentada por Ariathurai e Partheniades (de acordo com Huang *et al.*, 2006), é expressa por:

$$Q_{es} = \begin{cases} M_{es} \left(\frac{\tau - \tau_{cr,es}}{\tau_{cr,es}} \right), & \tau \geq \tau_{cr,es} \\ 0, & \tau < \tau_{cr,es} \end{cases} \quad (4.1)$$

A constante da taxa de erosão superficial (M_{es}) depende de parâmetros físico-químicos, que determinam as forças inter-partículas características dos sedimentos coesivos (Araújo, 2004). Esta constante toma valores consoante a massa volúmica, a qual pode variar em profundidade e no tempo (Huang *et al.*, 2006).

A equação para a determinação da taxa de erosão superficial, proposta por Parchure e Mehta (1985), escreve-se como:

$$Q_{es} = M_{es} e^{(\alpha \sqrt{\tau - \tau_{cr,es}})} \quad (4.2)$$

em que a taxa de erosão superficial se expressa em g/m^2 .

Para Parchure e Mehta (1985), a constante da taxa de erosão superficial designa-se por erodibilidade e varia entre 0,0067 e 0,3 $\text{g/m}^2/\text{s}$, enquanto, α varia entre 4,6 e 25,6 $\text{m/N}^{1/2}$. No entanto, para Van Rijn (de acordo com Lumborg, 2004), a erodibilidade assume valores entre 0,0005 e 0,005 $\text{g/m}^2/\text{s}$ e α entre 10 e 20 $\text{m/N}^{1/2}$.

Para a quantificação das tensões tangenciais críticas de erosão superficial e consequentemente taxas deveriam ser efectuados estudos de campo ou laboratoriais. No presente trabalho, fez-se variar alguns parâmetros para determinar a taxa de erosão superficial, com base em diferentes pressupostos, como se demonstra posteriormente.

4.2.1 Tensão tangencial crítica de erosão superficial, $\tau_{cr,es}$

Hwang e Mehta (segundo Huang *et al.*, 2006) realizaram experiências ao nível da erosão superficial, num canal anular, com sedimentos e fluido do Lago Okeechobee, na Florida, para determinar tensões tangenciais críticas e taxas de erosão superficial. Estes, ao obterem tensões tangenciais críticas para diferentes valores de massa volúmica molhada do fundo, desenvolveram uma equação que relaciona estas duas grandezas:

$$\tau_{cr,es} = a_{es} (\rho_m - \rho_l)^{b_{es}} + c_{es} \quad (4.3)$$

sugerindo para a_{es} , ρ_l , b_{es} e c_{es} , os valores de 0,883, 1,065 g/cm^3 , 0,2 e 0,05, respectivamente, e em que os valores da massa volúmica molhada se expressam em g/cm^3 .

No entanto, como alternativa, no modelo numérico de Nicholson e O'Connor (de acordo com Huang *et al.*, 2006), a tensão tangencial crítica de erosão superficial é assumida como sendo dependente da massa volúmica seca do fundo:

$$\tau_{cr,es} = \tau_{rd} + A(\rho_s - \rho_{rd})^B \quad (4.4)$$

em que $\tau_{rd}=0,8 \times 10^{-1} \text{N/m}^2$, $A=0,5 \times 10^{-3} \text{Nm}^{5/2}/\text{kg}^{3/2}$, $\rho_{rd}=80 \text{kg/m}^3$ e $B=1,5$.

Van Rijn (segundo Huang *et al.*, 2006) também compilou dados relacionando a tensão tangencial crítica de erosão superficial com a massa volúmica seca, de onde resultou a seguinte equação:

$$\tau_{cr,es} = j(\rho_s)^k \quad (4.5)$$

Este menciona que o coeficiente k varia entre 1,00 e 2,50. Thorn e Parsons encontraram um $k=2,30$ para a lama do rio Brisbane, na Austrália, para o estuário de Grangemouth, na Escócia e em Belawan, na Indonésia. Burt determinou que $k=1,50$ para a lama da baía de Cardiff, na Inglaterra (Huang *et al.*, 2006). Em relação ao coeficiente j , não foi encontrada qualquer referência a eventuais valores existentes na literatura. Por conseguinte, a equação 4.5 não foi objecto de estudo, pois uma grande variação no coeficiente j acarretaria numa grande gama de valores de tensões tangenciais críticas de erosão superficial.

4.2.2 Constante da taxa de erosão superficial, M_{es}

Hwang e Mehta (de acordo com Huang *et al.*, 2006) apresentaram uma relação entre a constante da taxa de erosão superficial ($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{hr}$) e a massa volúmica molhada do depósito (g/cm^3), de acordo com a equação 4.6.

$$\log_{10} M_{es} = 0,23e^{\left(\frac{0,198}{\rho_m - 1,0023}\right)} \quad (4.6)$$

Também para o cálculo desta constante, Teisson, Latteux e Cormault (segundo Huang *et al.*, 2006), propuseram uma fórmula experimental, adequada ao estuário de Gironde, na França:

$$M_{es} = 0,55 \left(\frac{\rho_s}{1000} \right)^3 \quad (4.7)$$

Neste caso, o valor da constante da taxa de erosão superficial expressa-se em $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$.

4.3 Tensão tangencial crítica de erosão gravítica, $\tau_{cr,eg}$

Como referido, além da tensão tangencial crítica de erosão superficial, pode-se definir a tensão tangencial crítica de erosão gravítica. Assim, para a erosão gravítica, Hwang e Mehta (de acordo com Huang *et al.*, 2006) desenvolveram as relações que se apresentam nas equações 4.8 e 4.9.

$$\tau_{cr,eg} = a_{eg}\rho_m + b_{eg} \quad (4.8)$$

$$M_{eg} = \text{constante} \quad (4.9)$$

Como valores de a_{eg} , b_{eg} e M_{eg} , Hwang e Mehta sugerem 9,808, -9,934 e $224\text{mg}/\text{cm}^2/\text{hr}$, respectivamente, os quais foram obtidos por via experimental.

4.4 Massa volúmica

Para efectuar uma análise do comportamento das grandezas referidas nas secções 4.2 e 4.3 é necessário conhecer a massa volúmica dos sedimentos coesivos. Assim, aproveitando a caracterização dos sedimentos do talude dos muros marginais aos canais da Ria de Aveiro, realizada no âmbito do projecto MURANO, adoptaram-se os valores dos pesos volúmcos da campanha de campo realizada no dia 11 de Março de 2009, junto à antiga lota de Aveiro. Com estes valores, recorreu-se à equação 4.10 para determinar as respectivas massas volúmcas (Tabela 4.1).

$$\gamma = \rho g \quad (4.10)$$

Tabela 4.1: Pesos volúmcos e massas volúmcas dos sedimentos do talude dos muros marginais aos canais da Ria de Aveiro.

Amostra	γ (kN/m ³)	ρ (kg/m ³)
C1	15,9	1621
C2	16,1	1641
C3	15,5	1580

Assim, na análise paramétrica que se apresenta de seguida fez-se variar a massa volúmica entre 1500 e 1800kg/m³, englobando os resultados obtidos na campanha de campo.

4.5 Análise paramétrica

À semelhança do que foi realizado na secção 3.2, em seguida, demonstram-se as relações efectuadas entre variáveis relacionadas com o mecanismo da erosão.

4.5.1 Relação entre a tensão tangencial crítica de erosão superficial e a massa volúmica

Para estudar a relação entre a tensão tangencial crítica de erosão superficial e a massa volúmica, aplicaram-se as formulações propostas por Hwang e Mehta (equação 4.3) e Nicholson e O'Connor (equação 4.4). Na equação 4.3 considerou-se que a massa volúmica molhada representa a massa volúmica que caracteriza os sedimentos, e na equação 4.4 utilizaram-se as respectivas massas volúmcas secas. Estas foram determinadas por aplicação das equações 4.10 e 4.11, onde a densidade das partículas (G) assume o valor de 2,65. Assim, desta análise resultam as curvas apresentadas na Figura 4.1.

$$\gamma_s = \frac{\gamma - \gamma_w}{G - 1} G \quad (4.11)$$

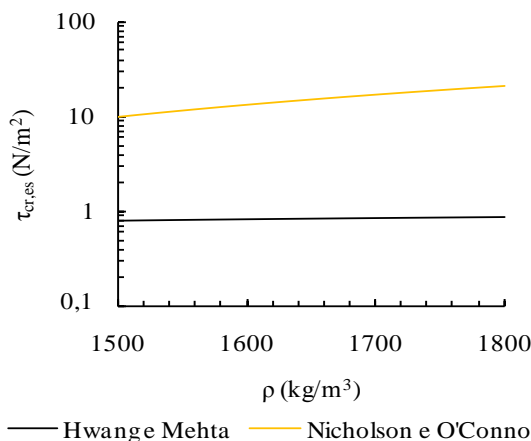


Figura 4.1: Relação entre a tensão tangencial crítica de erosão superficial e a massa volúmica.

Pela análise da Figura 4.1 constata-se que, para ambos os autores, à medida que a massa volúmica aumenta, a tensão tangencial crítica de erosão superficial também aumenta, pois a tensão tangencial crítica é proporcional à massa volúmica.

As duas equações são da mesma forma, mas verifica-se que a proposta de Nicholson e O'Connor resulta em maiores valores de tensão tangencial crítica de erosão superficial, devido aos valores de τ_{rd} e de B adoptados serem superiores aos correspondentes valores de c_{es} e b_{es} propostos por Hwang e Mehta, bem como, devido ao valor da massa volúmica recém depositada (ρ_{rd}) ser menor do que a constante de Hwang e Mehta (ρ_l). A diferença de resultados entre as duas formulações aumenta com a massa volúmica, variando entre tensões 12 a 24 vezes superiores na proposta de Nicholson e O'Connor.

4.5.2 Relação entre a constante da taxa de erosão superficial e a massa volúmica

Na análise da relação entre a constante da taxa de erosão superficial e a massa volúmica, comparam-se os resultados das propostas de Hwang e Mehta (equação 4.6) e de Teisson *et al.* (equação 4.7), fazendo variar a massa volúmica entre 1500 e 1800 kg/m³ (Figura 4.2).

Da Figura 4.2 há que realçar que as curvas têm uma tendência de comportamento oposto. Segundo Hwang e Mehta, a constante da taxa de erosão superficial diminui com a massa volúmica, sendo a sua variação de 12% no intervalo analisado. Para a mesma gama de valores, mas segundo Teisson *et al.*, a constante da taxa de erosão superficial aumenta cerca de 300%.

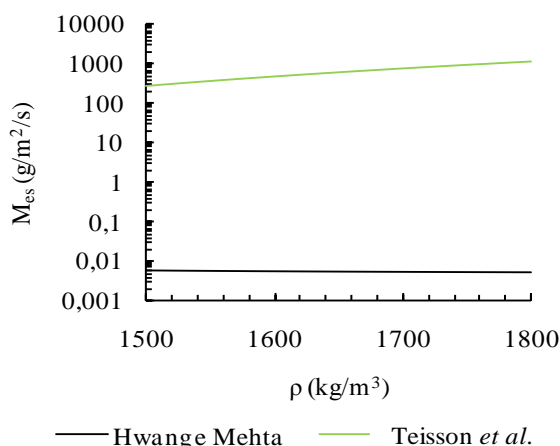


Figura 4.2: Relação entre a constante da taxa de erosão superficial e a massa volúmica.

4.5.3 Relação entre a tensão tangencial crítica de erosão gravítica e a massa volúmica

A tensão tangencial crítica de erosão gravítica foi determinada segundo a equação 4.8, de Hwang e Mehta. Esta tensão varia linearmente com a massa volúmica molhada, pelo que resulta o comportamento que se apresenta na Figura 4.3.

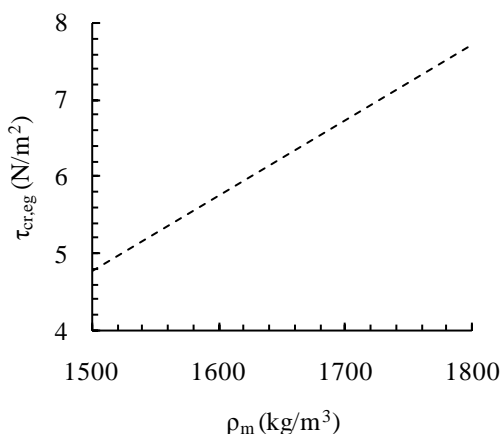


Figura 4.3: Relação entre a tensão tangencial crítica de erosão gravítica e a massa volúmica molhada.

Na mesma gama de valores da massa volúmica, os valores da tensão tangencial crítica de erosão superficial de Hwang e Mehta são menores do que os valores da tensão tangencial crítica de erosão gravítica, pois é mais fácil erodir sedimentos através das ondas e correntes do que por gravidade.

Os valores da tensão tangencial crítica de erosão superficial de Nicholson e O'Connor apresentados na secção 4.5.1 são maiores do que os valores da tensão tangencial crítica de erosão gravítica de Hwang e Mehta.

As tensões tangenciais críticas de erosão superficial e de erosão gravítica podem ser da mesma ordem de grandeza, já que as tensões tangenciais críticas gravíticas obtidas se situam entre os valores que resultaram das duas formulações para estimar as tensões tangenciais críticas de erosão superficial.

4.5.4 Relação entre a taxa de erosão superficial e a velocidade média do escoamento

A taxa de erosão superficial pode relacionar-se com a velocidade média do escoamento segundo vários critérios. Neste trabalho apresentam-se a análise das propostas de Ariathurai e Partheniades e a de Parchure e Mehta.

4.5.4.1 Taxa de erosão superficial segundo Ariathurai e Partheniades

Para a determinação da taxa de erosão superficial segundo Ariathurai e Partheniades aplicou-se a equação 4.1. Considerou-se que as tensões tangenciais no fundo seriam as calculadas na análise da deposição (capítulo 3).

Como a tensão tangencial crítica de erosão superficial e a constante da taxa de erosão superficial variam entre dois valores extremos, para a mesma massa volúmica, nesta análise conjugaram-se as seguintes situações: $\tau_{cr,es}$ mínima e M_{es} mínima; $\tau_{cr,es}$ máxima e M_{es} mínima; $\tau_{cr,es}$ mínima e M_{es} máxima e $\tau_{cr,es}$ máxima e M_{es} máxima, para um ρ de 1500kg/m^3 e um ρ de 1800kg/m^3 . Os valores da massa volúmica correspondem aos extremos da gama assumida nas secções anteriores. Na tabela seguinte apresentam-se os valores adoptados nestes cenários e nas Figuras 4.4 a 4.7 demonstram-se graficamente os respectivos resultados obtidos.

Tabela 4.2: Pressupostos admitidos para a determinação da taxa de erosão superficial segundo Ariathurai e Partheniades.

Situação	Variável		
	ρ (kg/m^3)	$\tau_{cr,es}$ (N/m^2)	M_{es} ($\text{g/m}^2/\text{s}$)
$\tau_{cr,es}$ mínima e M_{es} mínima	1500	0,798	0,0061
	1800	0,880	0,0055
$\tau_{cr,es}$ máxima e M_{es} mínima	1500	9,801	0,0061
	1800	20,991	0,0055
$\tau_{cr,es}$ mínima e M_{es} máxima	1500	0,798	284,81
	1800	0,880	1166,59
$\tau_{cr,es}$ máxima e M_{es} máxima	1500	9,801	284,81
	1800	20,991	1166,59

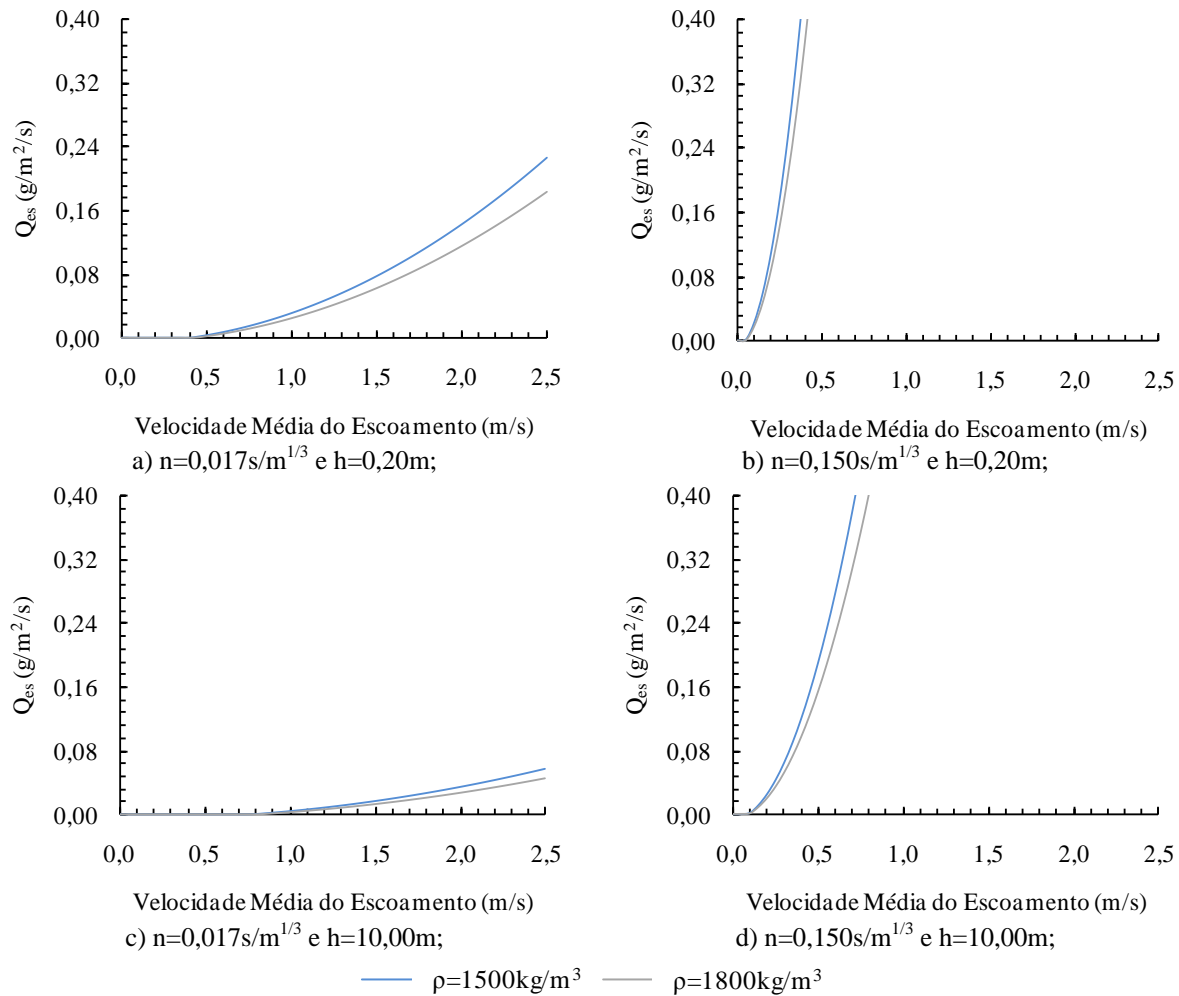


Figura 4.4: Relação entre a taxa de erosão superficial e a velocidade média do escoamento ($\tau_{cr,es}$ mínima e M_{es} mínima).

Da Figura 4.4 conclui-se que, para baixas rugosidades e com pequenas alturas do escoamento ($n=0,017s/m^{1/3}$ e $h=0,20m$), quando a velocidade média do escoamento é superior a cerca de $0,40m/s$ espera-se que aconteça erosão superficial. Para a mesma altura do escoamento, mas maior rugosidade ($n=0,150s/m^{1/3}$), há erosão superficial qualquer que seja a velocidade média do escoamento.

Para elevadas alturas do escoamento e baixas rugosidades ($h=10,00m$ e $n=0,017s/m^{1/3}$), quando a velocidade média do escoamento é superior a cerca de $0,80m/s$, há erosão superficial, enquanto para o mesmo h , mas $n=0,150s/m^{1/3}$ há erosão superficial a partir da velocidade de $0,10m/s$.

Para a tensão tangencial crítica de erosão superficial e constante da taxa de erosão superficial mínimas, não existe significativas diferenças da taxa de erosão superficial entre os diferentes valores assumidos para a massa volúmica.

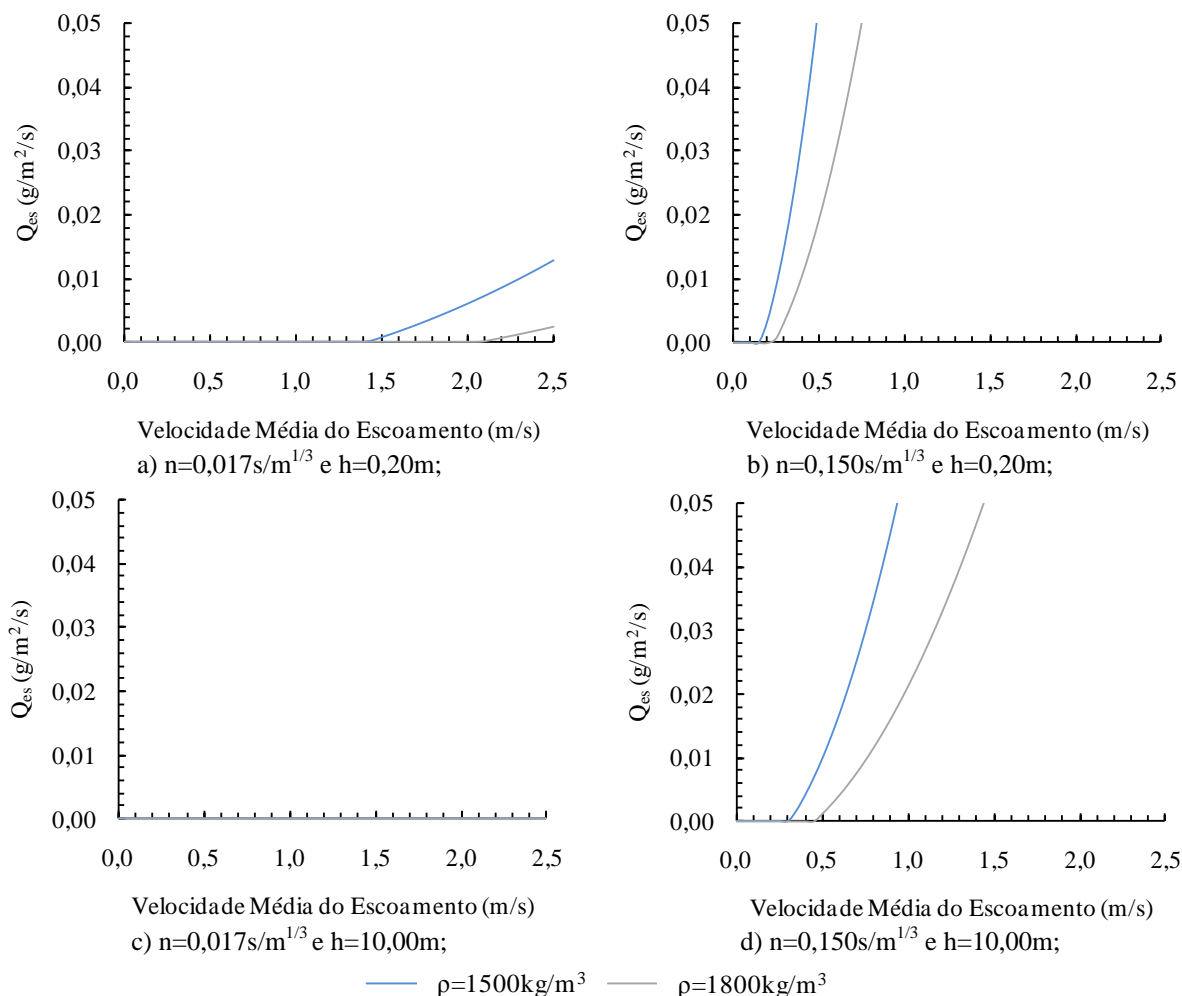


Figura 4.5: Relação entre a taxa de erosão superficial e a velocidade média do escoamento ($\tau_{cr,es}$ máxima e M_{es} mínima).

Da análise da Figura acima retiram-se as velocidades médias do escoamento a partir das quais se espera que ocorra erosão superficial, encontrando-se estas resumidas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Velocidades médias v.s. ocorrência de erosão superficial.

ρ (kg/m^3)	h (m)	n ($\text{s/m}^{1/3}$)	\bar{U} (m/s)	Erosão Superficial
1500	0,20	0,017	$> 1,45$	Espera-se que aconteça.
		0,150	$> 0,15$	Espera-se que aconteça.
	10,00	0,017	-	Não se espera que aconteça.
		0,150	$> 0,30$	Espera-se que aconteça.
1800	0,20	0,017	$> 2,15$	Espera-se que aconteça.
		0,150	$> 0,20$	Espera-se que aconteça.
	10,00	0,017	-	Não se espera que aconteça.
		0,150	$> 0,45$	Espera-se que aconteça.

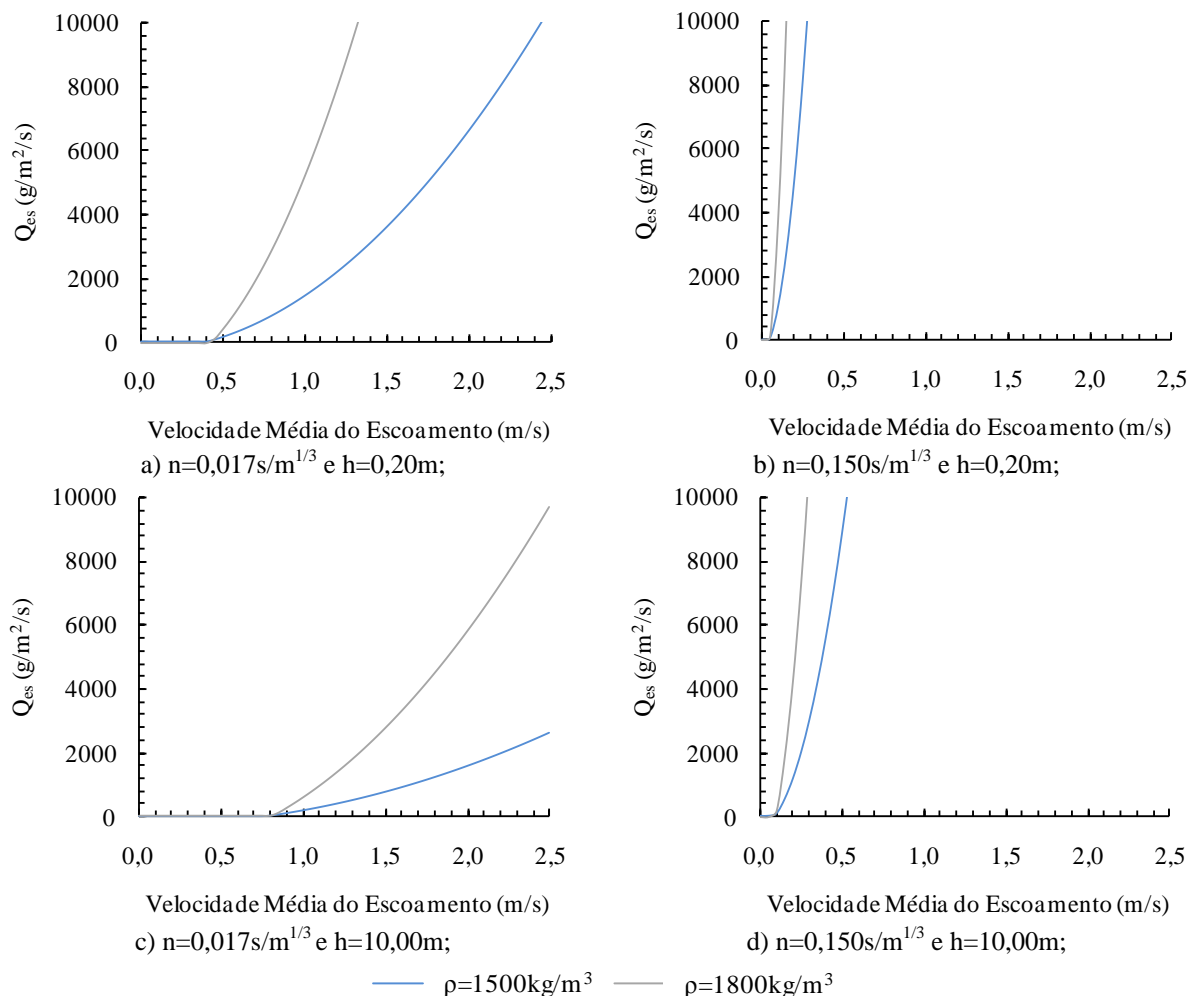


Figura 4.6: Relação entre a taxa de erosão superficial e a velocidade média do escoamento ($\tau_{cr,es}$ mínima e M_{es} máxima).

Ao comparar os resultados demonstrados na Figura 4.6 com os da Figura 4.4, chega-se à conclusão que as velocidades médias do escoamento a partir das quais ocorre erosão superficial são iguais ou ligeiramente inferiores, atendendo à rugosidade e à altura do escoamento. Esta conclusão também se retira da comparação dos resultados evidenciados na Figura 4.7 com os da Figura 4.5.

A taxa de erosão superficial aumenta com a velocidade média do escoamento e com a rugosidade, diminuindo com a altura do escoamento. Verificando-se que a rugosidade influi mais na taxa de erosão superficial do que a altura do escoamento.

Das quatro situações das Figuras 4.4 a 4.7 constata-se que os maiores valores da taxa de erosão superficial são obtidos quando a tensão tangencial crítica assume o valor mínimo e a constante da taxa de erosão superficial toma o valor máximo. Os menores valores da taxa

de erosão superficial são obtidos para a tensão tangencial crítica máxima e para a constante da taxa de erosão superficial mínima.

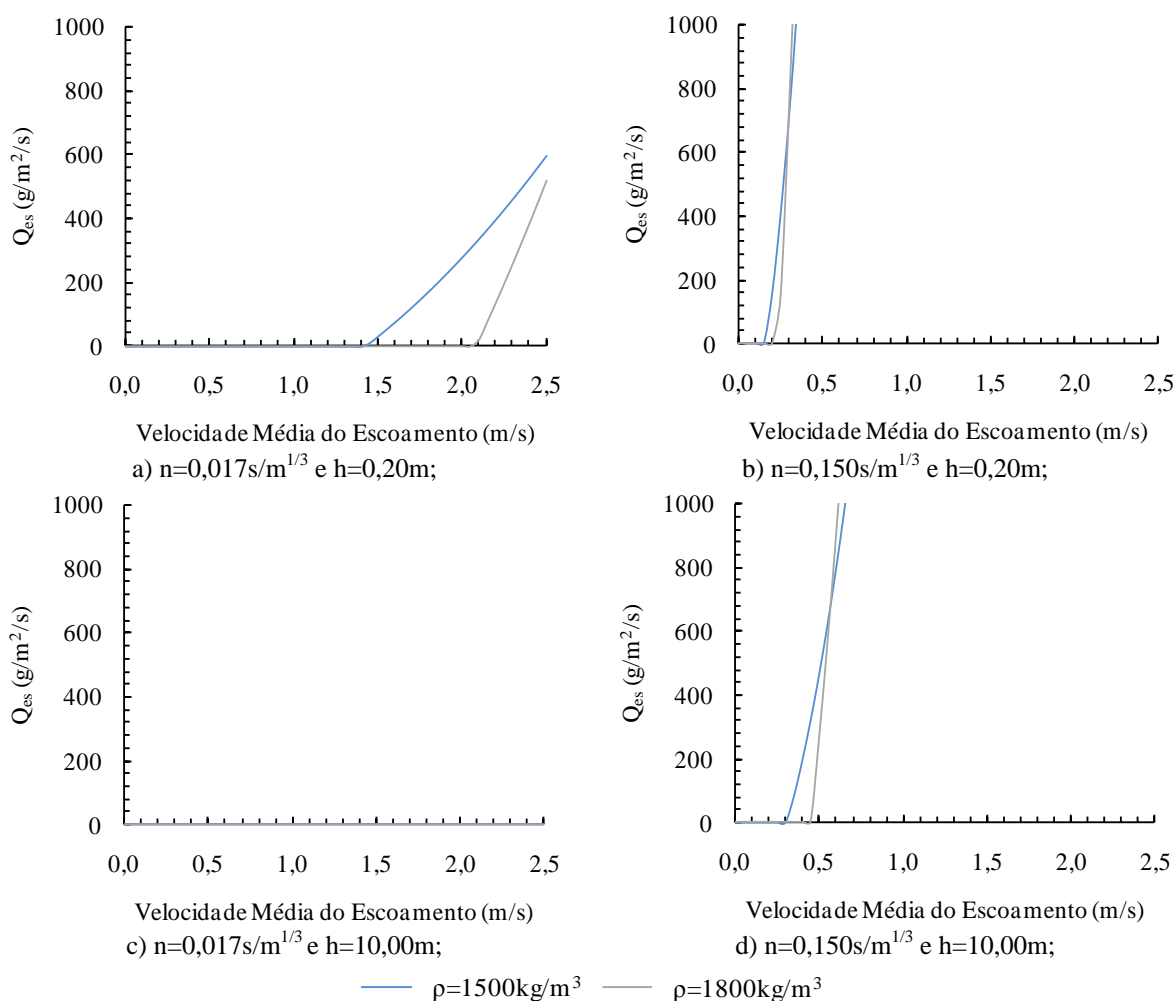


Figura 4.7: Relação entre a taxa de erosão superficial e a velocidade média do escoamento ($\tau_{cr,es}$ máxima e M_{es} máxima).

4.5.4.2 Taxa de erosão superficial segundo Parchure e Mehta

No estudo da taxa de erosão superficial segundo Parchure e Mehta (equação 4.2), utilizou-se o valor da tensão tangencial crítica de erosão superficial, de acordo com Hwang e Mehta, para o valor médio da gama de valores da massa volúmica utilizados anteriormente ($\rho=1650\text{kg/m}^3$), pois a taxa de erosão estimada segundo esta proposta é independente da massa volúmica. As tensões tangenciais no fundo, à semelhança da secção anterior, são as calculadas na deposição. A taxa de erosão superficial foi calculada para um valor mínimo de erodibilidade de $0,0067\text{g/m}^2/\text{s}$ e para um α de $4,6\text{m/N}^{1/2}$, ambos propostos por Parchure e Mehta (secção 4.2), resultando nos gráficos apresentados na Figura 4.8.

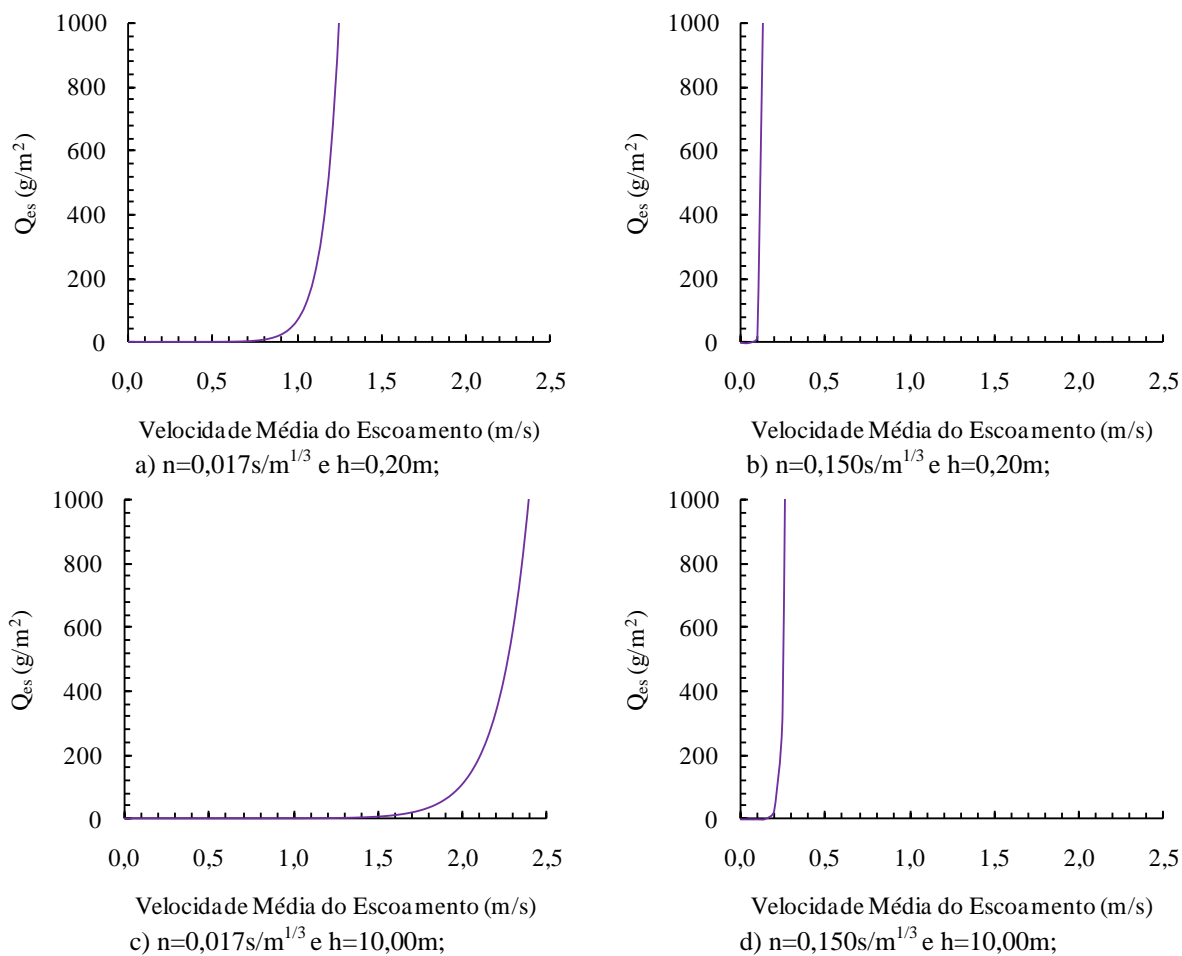


Figura 4.8: Relação entre a taxa de erosão superficial e a velocidade média do escoamento, segundo Parchure e Mehta.

Como na secção anterior, a taxa de erosão superficial aumenta com a velocidade média do escoamento e com a rugosidade, diminuindo com a profundidade. Dos gráficos das alíneas b e d, da Figura 4.8, pode-se concluir que quando a rugosidade do fundo é elevada a taxa de erosão superficial resultante é elevadíssima, ocorrendo fenómenos de erosão extrema.

Realizou-se uma análise idêntica, mas para os valores máximos propostos por estes autores, nomeadamente, $M_{es}=0,3g/m^2/s$ e $\alpha=25,6m/N^{1/2}$. Neste caso, as taxas de erosão superficial obtidas também são elevadíssimas.

CAPÍTULO 5

APLICAÇÃO À RIA DE AVEIRO

Neste capítulo aplicam-se algumas formulações da deposição e da erosão à análise da Ria de Aveiro.

5.1 Introdução

A Ria de Aveiro é utilizada para a produção de sal, actividade que já teve grande importância na economia aveirense, mas que tem vindo a perder com o decorrer dos anos a sua preponderância, devido, em parte, à erosão de alguns muros das marinhas e assoreamento de alguns canais. Assim, dada a sua implicação na região, neste capítulo estuda-se os mecanismos de deposição e de erosão dos sedimentos coesivos aplicados à Ria.

Neste estudo foram adoptadas duas situações de maré: maré morta e maré viva, com implicações no nível de água no canal. Para estas duas situações foram adoptados valores da altura do escoamento (h) e da velocidade média do escoamento (\bar{U}), consoante a maré se encontrava em estofa de preia-mar, vazante, enchente, estofa de baixa-mar e enchente (Figura 5.1).

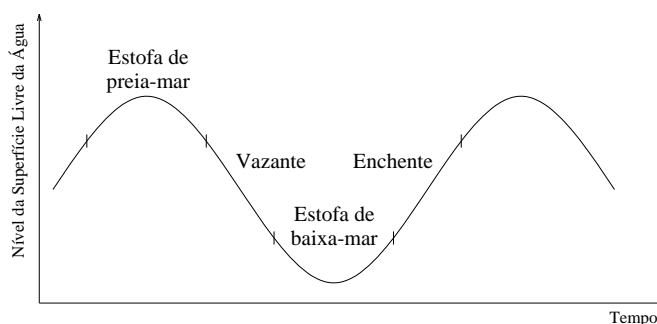


Figura 5.1: Ciclo de maré.

Os valores de h e \bar{U} provêm de resultados obtidos das campanhas realizadas no âmbito do projecto Interreg SAL nos dias 22 de Maio de 2006 (maré morta) e 13 de Julho de 2006 (maré viva), junto à antiga lota de Aveiro. Considerou-se a análise no canal de menor dimensão, correspondente ao ponto de amostragem P1 da Figura 5.2. Na Tabela 5.1

apresentam-se os respectivos valores da altura e da velocidade média do escoamento para as duas situações de maré.



Figura 5.2: Pontos de amostragem das campanhas realizadas ao longo do projecto Interreg SAL (adaptado de Coelho *et al.*, 2008).

Tabela 5.1: Valores de h e \bar{U} adoptados para marés mortas e marés vivas.

Marés	Variável	Estofa de preia-mar	Vazante	Estofa de baixa-mar	Enchente
Mortas	h (m)	2,2	1,4	0,6	1,4
	\bar{U} (m/s)	0,2	-0,8	-0,2	0,6
Vivas	h (m)	2,5	1,4	0,3	1,4
	\bar{U} (m/s)	0,3	-1,2	-0,3	0,9

5.2 Deposição

Como apresentado no capítulo 3, para a determinação de valores da taxa de deposição é necessário estimar valores da concentração de matéria particulada em suspensão, da velocidade de queda e da probabilidade de deposição.

Assim, adoptou-se como valor da concentração de matéria particulada em suspensão 30mg/l, o qual se aproxima dos resultados obtidos na 1ª campanha do projecto MURANO. A velocidade de queda foi determinada aplicando-se a equação 3.4, em que se assumiu um $K=0,001$ e um $m=1,00$, valores propostos por Cole e Miles e Van Rijn (secção 3.1.2.1). Esta situação representa um comportamento intermédio entre as formulações analisadas para o cálculo da velocidade de queda. Com estes valores estimou-se uma velocidade de queda de 30×10^{-6} m/s.

As taxas de deposição foram determinadas para um coeficiente de rugosidade de Manning de $0,050 \text{ s/m}^{1/3}$.

Segundo Lopes *et al.* (2006), para a maior parte dos estuários e lagunas, a tensão tangencial crítica de deposição total toma o valor de $0,10\text{N/m}^2$.

5.2.1 Taxas de deposição em marés mortas

Em função dos valores da velocidade média e da altura do escoamento para marés mortas, e da rugosidade, anteriormente referidos, determinaram-se as velocidades de atrito pela equação 3.8. Após este cálculo tornou-se possível a determinação das respectivas tensões tangenciais no fundo (equação 3.16). Com os valores da tensão tangencial no fundo e com $\tau_{d,\text{total}}=0,10\text{N/m}^2$ determinou-se, por aplicação da equação 3.14, as probabilidades de deposição (Tabela 5.2).

Tabela 5.2: Velocidades de atrito, tensões tangenciais no fundo e probabilidades de deposição para marés mortas (nd - não há deposição).

Variável	Estofa de preia-mar	Vazante	Estofa de baixa-mar	Enchente
	h=2,2m	h=1,4m	h=0,6m	h=1,4m
	$\bar{U}=0,2\text{m/s}$	$\bar{U}=-0,8\text{m/s}$	$\bar{U}=-0,2\text{m/s}$	$\bar{U}=0,6\text{m/s}$
u_* (m/s)	0,027	0,118	0,034	0,089
τ (N/m ²)	0,754	14,031	1,163	7,892
P_d	nd	nd	nd	nd

Da Tabela 5.2 conclui-se que, para as características adoptadas não há condições de deposição ao longo de todo o ciclo de maré.

5.2.2 Taxas de deposição em marés vivas

Para as taxas de deposição em marés vivas adoptaram-se os valores da altura do escoamento da Tabela 5.1, caracterizados por extremos mais afastados, nas estofas de preia-mar e de baixa-mar. A velocidade média do escoamento toma valores maiores que nas marés mortas. Nesta análise seguiu-se a metodologia adoptada anteriormente. Assim, na Tabela 5.3 apresentam-se os resultados obtidos da velocidade de atrito, da tensão tangencial no fundo e da probabilidade de deposição.

Tabela 5.3: Velocidades de atrito, tensões tangenciais no fundo e probabilidades de deposição para marés vivas (nd - não há deposição).

Variável	Estofa de preia-mar	Vazante	Estofa de baixa-mar	Enchente
	h=2,5m	h=1,4m	h=0,3m	h=1,4m
	$\bar{U}=0,3\text{m/s}$	$\bar{U}=-1,2\text{m/s}$	$\bar{U}=-0,3\text{m/s}$	$\bar{U}=0,9\text{m/s}$
u_* (m/s)	0,040	0,178	0,057	0,133
τ (N/m ²)	1,626	31,569	3,297	17,758
P_d	nd	nd	nd	nd

Como seria de esperar, à semelhança da secção 5.2.1, em condições de marés vivas também não há deposição.

5.3 Erosão

Como exposto no capítulo 4, para a quantificação das taxas de erosão superficial existem as equações propostas por Ariathurai e Partheniades e por Parchure e Mehta. Contudo, neste capítulo apenas se quantificou as taxas de erosão superficial pela equação proposta por Ariathurai e Partheniades. Assim, foi necessário conhecer o valor da tensão tangencial crítica de erosão superficial e a constante da taxa de erosão superficial. Lopes *et al.* (2006), referem valores comuns para estes parâmetros, em estuários e lagunas, que são $\tau_{cr,es}=0,20\text{N/m}^2$ e $M_{es}=2\times 10^{-5}\text{kg/m}^2/\text{s}$, respectivamente.

À semelhança da deposição, adoptaram-se as mesmas duas situações de maré e assumiram-se os anteriores valores da altura e da velocidade média do escoamento, bem como os respectivos resultados das tensões tangenciais no fundo.

5.3.1 Taxas de erosão superficial em marés mortas

Na Tabela 5.4 apresentam-se os valores da taxa de erosão superficial obtidos para as condições de marés mortas.

Tabela 5.4: Taxas de erosão superficial ($\text{kg/m}^2/\text{s}$) para marés mortas.

Variável	Estofa de preia-mar	Vazante	Estofa de baixa-mar	Enchente
$Q_{es} (1\times 10^{-6}\text{kg/m}^2/\text{s})$	55	1383	96	769

Da Tabela 5.4 conclui-se que, num ciclo de maré, é na vazante que ocorre maior erosão. A menor erosão ocorre já nas situações de estofa de maré, principalmente na preia-mar.

5.3.2 Taxas de erosão superficial em marés vivas

Na Tabela 5.5 apresentam-se os valores obtidos da taxa de erosão superficial para marés vivas.

Tabela 5.5: Taxas de erosão superficial ($\text{kg/m}^2/\text{s}$) para marés vivas.

Variável	Estofa de preia-mar	Vazante	Estofa de baixa-mar	Enchente
$Q_{es} (1\times 10^{-6}\text{kg/m}^2/\text{s})$	143	3137	310	1756

Como para as marés mortas, verifica-se que é na vazante que ocorre maior erosão e é na estofa de preia-mar que esta é menor.

Para o cálculo da taxa de erosão superficial anual admitiu-se que num ano ocorrem marés mortas durante 6 meses e marés vivas durante os restantes 6 meses. Também se considerou que a estofa de preia-mar, a vazante, a estofa de baixa-mar e a enchente ocorrem durante

$\frac{1}{4}$ do dia. Assim, nas condições admitidas para a erosão, junto à antiga lota de Aveiro, conclui-se que anualmente a taxa de erosão superficial é estimada em 165kg/m^2 .

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões do trabalho realizado e apresentam-se possíveis desenvolvimentos para futuras investigações.

6.1 Conclusões

O transporte de sedimentos coesivos envolve diversos mecanismos, nomeadamente, a floculação, a sedimentação, a deposição, a consolidação, a erosão, e a adsorção e desadsorção. Com o objectivo de caracterizar cada um deles, efectuou-se a descrição sumária do que consiste cada um dos fenómenos.

A dificuldade em adoptar valores característicos e a diversidade de formulações levaram ao estudo mais detalhado dos mecanismos de deposição e de erosão.

Na quantificação da deposição foram determinadas taxas de deposição, de acordo com a fórmula de Krone. Esta expressão requer a estimativa de valores da concentração de matéria particulada em suspensão, da velocidade de queda e da probabilidade de deposição. Cada uma destas grandezas pode ser obtida de diversas formas, resultando, em geral, valores significativamente diferentes. Como tal, efectuou-se uma comparação de valores.

Para proceder à análise paramétrica foi necessário adoptar valores da concentração de matéria particulada em suspensão, os quais foram adoptados com apoio em valores determinados laboratorialmente por Abrantes (2005). De entre os inúmeros valores da concentração de matéria particulada em suspensão sugeridos nesse trabalho, apenas se seleccionaram o menor e o maior valor, 2,36mg/l e 74,96mg/l, respectivamente.

A velocidade de queda ao ter um comportamento distinto em função da concentração de matéria particulada em suspensão pode ser estimada à custa de diferentes formulações. Assim, há formulações que estimam a velocidade de queda em situações de baixas concentrações de sedimentos e outras formulações que podem ser utilizadas para qualquer valor da concentração de sedimentos.

Na determinação da velocidade de queda segundo a equação utilizada por Cole e Miles, por Van Rijn e por Van Leussen, para baixas concentrações de sedimentos, concluiu-se que o parâmetro que influencia mais os resultados é a constante K e não a constante empírica m .

Ao analisar a dependência da velocidade de queda com a concentração de matéria particulada em suspensão verificou-se que a velocidade de queda cresce indefinidamente com o aumento da concentração de matéria particulada em suspensão. Contudo, a diferença de resultados é significativa e há resultados de formulações que, para baixas concentrações, são maiores que outros resultados para altas concentrações. Concluiu-se que os valores mais altos ($5,56 \times 10^{-4}$ m/s) e mais baixos ($6,39 \times 10^{-13}$ m/s) da velocidade de queda são obtidos para a formulação proposta por Van Leussen.

Para determinar os valores do parâmetro de dissipação foi necessário calcular taxas de dissipação de energia cinética da turbulência que, por sua vez, dependem da velocidade de atrito, e determinar a viscosidade cinemática da água. A viscosidade cinemática da água depende da temperatura à qual a água se encontra, a qual foi estimada em $1,12 \times 10^{-6}$ m²/s.

Do estudo da relação entre a velocidade de atrito e a velocidade média do escoamento chegou-se à conclusão que, nas situações conjugadas de valores mínimos e máximos de rugosidade e de altura do escoamento, a velocidade de atrito aumenta com o aumento da velocidade média do escoamento e da rugosidade, e com a diminuição da altura do escoamento.

Da relação entre a taxa de dissipação e a distância ao fundo verificou-se que, o aumento da distância ao fundo fazia com que a taxa de dissipação diminuísse, independentemente da altura do escoamento e respectivo valor da velocidade de atrito. Também foi possível verificar que a situação de maior velocidade de atrito ($u_* = 1,536$ m/s) foi aquela que apresentou maiores valores da taxa de dissipação. Quanto maior for a velocidade de atrito, maior é a dissipação de energia, pois existe maior resistência ao escoamento.

Na determinação da velocidade de queda de acordo com a equação proposta por Van Leussen, que incluía um parâmetro de dissipação, chegou-se à conclusão que a velocidade de queda aumentava com a aproximação à superfície, pois naquela zona a dissipação de energia é menor, logo a turbulência é menor e os sedimentos tendem a depositar.

Na determinação da velocidade de queda segundo a equação proposta por Burban *et al.* chegaram-se as seguintes conclusões. Para baixas rugosidades e baixas concentrações de sedimentos em suspensão, a velocidade de queda aumenta e depois diminui. Para elevadas concentrações de sedimentos já não se verifica o mesmo, pois o aumento da velocidade média do escoamento leva ao aumento da velocidade de queda. Quando a rugosidade é elevada, a velocidade de queda aumenta com o aumento da velocidade média do escoamento. Este aumento ocorre de forma mais acentuada para elevadas concentrações sedimentares.

A probabilidade de deposição foi calculada conforme a formulação referida em Huang *et al.* (2006), Teisson (1997) e Trento *et al.* (2005). Esta é dependente da tensão tangencial no fundo e da tensão tangencial crítica de deposição total.

A probabilidade de deposição diminui com o aumento da velocidade média do escoamento. Para os mesmos valores da velocidade média e da altura do escoamento, mas diferentes coeficientes de rugosidade, a probabilidade de deposição diminui, pois a velocidade de atrito junto ao fundo é maior levando a que a tensão tangencial seja maior, e assim os sedimentos não depositam tanto.

A taxa de deposição diminui com o aumento da velocidade média do escoamento, e aumenta com a altura do escoamento, com a velocidade de queda e com a concentração de matéria particulada em suspensão.

Os maiores valores obtidos da taxa de deposição são os determinados à custa da equação da velocidade de queda de Burban *et al.*. Contudo, para este autor os resultados são escassos. Primeiro, as probabilidades de deposição apontam para que não haja deposição e segundo, a formulação de Burban *et al.* não estima valores de velocidade de queda para baixas velocidades do escoamento.

A erosão pode ser de vários tipos, contudo neste trabalho apenas se analisa a erosão superficial e a erosão gravítica.

Para a quantificação da erosão superficial determinaram-se as respectivas taxas, com base nas equações propostas por Ariathurai e Partheniades (de acordo com Huang *et al.*, 2006) e por Parchure e Mehta (1985). Não foi quantificada a taxa para a erosão gravítica. Apesar disso, quantificou-se a tensão tangencial crítica de erosão gravítica, pela equação proposta por Hwang e Mehta (segundo Huang *et al.*, 2006).

Para estudar a relação entre a tensão tangencial crítica de erosão superficial e a massa volúmica, aplicaram-se as formulações propostas por Hwang e Mehta e Nicholson e O'Connor. Destas constataram-se que o aumento da massa volúmica faz com que a tensão tangencial crítica de erosão superficial também aumente, pois a tensão tangencial crítica é directamente proporcional à massa volúmica.

Na análise da relação entre a constante da taxa de erosão superficial e a massa volúmica, compararam-se os resultados das propostas de Hwang e Mehta e de Teisson *et al.*, fazendo variar a massa volúmica entre 1500 e 1800kg/m³. Desta análise realçou-se o facto das curvas terem uma tendência de comportamento oposto. Segundo Hwang e Mehta, a constante da taxa de erosão superficial diminui com a massa volúmica, sendo a sua variação de 12% no intervalo analisado. Para a mesma gama de valores, mas segundo Teisson *et al.*, a constante da taxa de erosão superficial aumenta cerca de 300%.

As tensões tangenciais críticas de erosão superficial e de erosão gravítica podem ser da mesma ordem de grandeza, já que as tensões tangenciais críticas gravíticas obtidas se situam entre os valores que resultaram das duas formulações para estimar as tensões tangenciais críticas de erosão superficial.

Como a tensão tangencial crítica de erosão superficial e a constante da taxa de erosão superficial variam entre dois valores extremos, na determinação da taxa de erosão superficial segundo Ariathurai e Partheniades conjugaram-se os respectivos valores máximos e mínimos para a mesma massa volúmica.

Para a tensão tangencial crítica de erosão superficial e constante da taxa de erosão superficial mínimas, não existe significativas diferenças da taxa de erosão superficial entre os diferentes valores assumidos para a massa volúmica.

Para a mesma tensão tangencial crítica de erosão superficial mas diferente constante da taxa de erosão superficial, chega-se à conclusão que as velocidades médias do escoamento a partir das quais ocorre erosão superficial são iguais ou ligeiramente inferiores, atendendo à rugosidade e à altura do escoamento.

A taxa de erosão superficial aumenta com a velocidade média do escoamento e com a rugosidade, diminuindo com a altura do escoamento. Verificou-se que a rugosidade influi mais na taxa de erosão superficial do que a altura do escoamento.

Das situações analisadas para a taxa de erosão superficial segundo a fórmula de Ariathurai e Partheniades constatou-se que os maiores valores da taxa de erosão superficial são obtidos quando a tensão tangencial crítica assume o valor mínimo e a constante da taxa de erosão superficial toma o valor máximo. Os menores valores da taxa de erosão superficial são obtidos para a tensão tangencial crítica máxima e para a constante da taxa de erosão superficial mínima.

No estudo da taxa de erosão superficial segundo Parchure e Mehta quando a rugosidade do fundo é elevada, a taxa de erosão superficial resultante é elevadíssima, ocorrendo fenómenos de erosão extrema.

Da aplicação à Ria de Aveiro chegou-se à conclusão que, junto à antiga lota de Aveiro, não ocorre deposição quer em marés mortas quer em marés vivas. Também se concluiu que anualmente a taxa de erosão superficial dos sedimentos coesivos é de 165kg/m^2 .

6.2 Desenvolvimentos futuros

Ao longo deste trabalho desenvolveram-se estudos sobre os mecanismos de deposição e de erosão de forma algo aprofundada mas, sendo este um campo muito vasto, torna-se necessário desenvolver estudos mais específicos sobre esta matéria.

Neste sentido, propõem-se a elaboração de investigações laboratoriais que complementem e comprovem as formulações teóricas. Algumas das grandezas estudadas podem ser quantificadas em laboratório, pelo que o teste laboratorial e a comparação com as formulações numéricas pode auxiliar na escolha mais adequada, por exemplo para caracterizar o comportamento da Ria de Aveiro.

Também se propõe o estudo dos outros mecanismos do transporte de sedimentos coesivos, de forma à sua melhor compreensão, pois fenómenos como a floculação, a sedimentação ou a adsorção não foram abordados em detalhe neste trabalho. Também se podem avaliar quais os níveis de incerteza que estão associados à sua caracterização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A

Abrantes, M. I. R. R. (2005), *Os sedimentos superficiais da margem continental, sector Espinho – Cabo Mondego: a utilização das fracções finas como traçadores de dinâmica sedimentar actual*, PhD Thesis, Universidade de Aveiro, 239 p.

Araújo, I. G. B. (2005), *Sea Level Variability: Examples from the Atlantic Coast of Europe*, PhD Thesis, Faculty of Science – School of Ocean & Earth Science, University of Southampton, 411 p.

Araújo, M. A. V. C. (2004), *Erosion Mechanisms In Marine Sediments*, PhD Thesis, Universidade do Minho, 284 p.

B

Benta, A. A. R. C. A. (2007), *Aspectos do Comportamento Geomecânico da Formação “Argilas de Aveiro”*, PhD Thesis, Universidade de Aveiro, 351 p.

Branco, M. A.; Santos, H.; Almeida, A.; Mineiro, A.; Mendes, P.; Velha, S.; Pinto, S. e Lemos, M. (2007), *Revitalização e Valorização Económica do Salgado de Aveiro*, Sal do Atlântico, Estudo de Mercado, Multiaveiro, 93 p. (não editado).

C

Cancino, L. e Neves, R. (1999), *Hydrodynamic and Sediment Suspension Modelling in Estuarine Systems, Part I: Description of the Numerical Models*, Journal of Marine Systems, 22, pp. 105-116.

Coelho, C.; Cardoso, C. e Dias, J. M. (2008), *Os Muros das Marinhas de Sal de Aveiro*, Projecto Interreg SAL – Sal do Atlântico, Relatório Final, Universidade de Aveiro, 46 p. (não editado).

Costa, D. R. (2007), *Qual a Dimensão do Movimento Browniano?*, Trabalho, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 10 p. (não editado).

F

Fernandes, L. D. F. (2001), *Transporte de Poluentes em Estuários*, Trabalho Final de Curso da Licenciatura em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior Técnico, 41 p. (não editado).

Fernandes, M. M. F. (1994), *Mecânica dos Solos*, FEUP.

Fialho, G. (2006), *Hidráulica – conceitos e aplicações*, Apresentação em PowerPoint, Escola Politécnica da UFRJ, 49 p. (não editado).

H

Hayter, E. J.; Bergs, M. A.; Gu, R.; McCutcheon, S. C.; Smith, S. J. e Whiteley, H. J. (1999), *HSCTM-2D, A Finite Element Model for Depth-Averaged Hydrodynamics, Sediment and Contaminant Transport*, Relatório Técnico, National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. EPA, Athens, Georgia, 199 p.

Huang, J.; Hilldale, R. C. e Greimann, B. P. (2006), *Erosion and Sedimentation Manual*, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, Technical Service Center Sedimentation and River Hydraulics Group, Denver, Colorado.

I

IMA (2008), Imagoteca Municipal de Aveiro (última consulta em Novembro de 2008): www.sal-atlantic.net.

J

Johansen, C.; Larsen, T. e Peterson, O. (1997), *Experiments on Erosion of Mud from the Danish Wadden Sea*, Cohesive Sediments/4th Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport Conference, INTERCOH'94, John Wiley & Sons, 21, pp. 305-314.

L

Lopes, J. F.; Dias, J. M. e Dekeyser, I. (2006), *Numerical modelling of cohesive sediments transport in the Ria de Aveiro lagoon, Portugal*, Journal of Hydrology, pp. 176-198.

Lumborg, U. (2004), *Cohesive sediment transport modelling – application to the Lister Dyb tidal area in the Danish Wadden Sea*, Journal of Coastal Research, 41, pp. 114-123.

M

Maggi, F. (2005), *Flocculation Dynamics of Cohesive Sediment*, PhD Thesis, Politecnico di Torino, Itália, 136 p.

P

Parchure, T. M. e Mehta A. J. (1985), *Erosion of Soft Cohesive Sediment Deposits*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, pp. 1308-1326.

R

Rebelo, F. (2007), *O Risco de Sedimentação na Laguna de Aveiro: Leitura Actual de um Texto de Amorim Girão (1922)*, Territorium, Revista da Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, RISCOS – Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, 14, pp. 63-69.

Rocha, J. A. S. (2008), Postal (última consulta em Novembro de 2008):

www.prof2000.pt.

T

Teisson, C. (1997), *A review of cohesive sediment transport models*, Cohesive Sediments/4th Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport Conference, INTERCOH'94, John Wiley & Sons, 21, pp. 367-381.

Trento, A. E.; Vinzón, S. B. e Mascarenhas, F. B. (2005), *Simulación del Transporte de Sedimentos Finos en el Estuario del Río Paraíba do Sul*, MECOM 2005 – VIII Congreso Argentino de Mecánica Computacional, pp. 3217-3234.

Trento, A. E. (2005), *Dinâmica da Floculação no Transporte de Sedimentos Finos*, PhD Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 170 p.

Thomann, R. V. e DiToro D. M. (1983), *Physico-Chemical Model of Toxic Substances in the Great Lakes*, Manhattan College, Environmental Engineering and Science, Gross Ile, Michigan, 163 p.